374
أبريل
2010



عالم المعرفة

تكنولوجيا النانو

من أجل غد أفضل

تأليف: أ. د. محمد شريف الإسكندراني

سلسلة كتب ثقافية شهرية يصدرها المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب - الكويت

عالم المعرفة

سلسلة كتب ثقافية شهرية يصدرها المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب - الكويت

صدرت السلسلة في يناير 1978

أسسها أحمد مشاري العدواني (1923-1990) ود. فؤاد زكريا (1927-2010)

374

تكنولوجيا النانو

من أجل غدٍ أفضل

تأليف: أ. د. محمد شريف الإسكندراني



أبريل 2010



سلسلة شهرية يصدرها
المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب

المشرف العام

أ. بدر سيد عبدالوهاب الرفاعي
bdrifai@nccal.org.kw

هيئة التحرير

د. فؤاد زكريا/ المستشار
أ. جاسم السعدون
د. خليفة عبدالله الوقيان
د. عبداللطيف البدر
د. عبدالله الجسمي
أ. عبدالهادي نافل الراشد
د. فريدة محمد العوضي

سكرتير التحرير

شروق عبدالمحسن مظفر
alam_almarifah@hotmail.com

التنضيد والإخراج والتنفيذ
وحدة الإنتاج
في المجلس الوطني

سعر النسخة

الكويت ودول الخليج	[illegible]
الدول العربية	ما يعادل دولارا أمريكيا
خارج الوطن العربي	أربعة دولارات أمريكية

الاشتراكات

دولة الكويت

للأفراد	15 د. ك
للمؤسسات	25 د. ك

دول الخليج

للأفراد	17 د. ك
للمؤسسات	30 د. ك

الدول العربية

للأفراد	25 دولارا أمريكيا
للمؤسسات	50 دولارا أمريكيا

خارج الوطن العربي

للأفراد	50 دولارا أمريكيا
للمؤسسات	100 دولار أمريكي

تسدد الاشتراكات مقدما بحوالة مصرفية باسم المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب وترسل على العنوان التالي:

السيد الأمين العام
للمجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب
ص. ب: 28613 - الصفاة
الرمز البريدي 13147
دولة الكويت
تليفون: 22431704 (965)
فاكس: 22431229 (965)
www.kuwaitculture.org.kw

ISBN 978 99906 0 306 4

رقم الإيداع (2010 006)

قبل أن تقرأ

تنعى سلسلة «عالم المعرفة» للأمة العربية قاطبة، الأستاذ الكبير الدكتور فؤاد زكريا الذي غيبه الموت في 12 مارس الماضي، عن عمر يناهز ثلاثة وثمانين عاما.

والراحل الكبير الذي كان واحدا من فرسان الفلسفة ورواد الفكر في مصر والعالم العربي، تجاوزت جهوده العلمية والفكرية دوره الأكاديمي والبحثي الذي خرج من عباءته العديد من تلاميذه ومريديه الذين سلكوا طريقه في البحث الجاد وإشعال مصابيح التنوير في محيطنا العربي، بل كان الرجل - رحمه الله - يؤمن بضرورة ألا يحصر المثقف الأكاديمي نفسه في دائرة «أسوار الجامعة»، فجعل من نفسه داعية للمستقبل، مبشرا بنهضة عربية طال انتظارها، وأطلق بين ربوع المجتمع العربي رياح الحداثة، ونشر في تربة الوطن الكبير بذور «التفكير العلمي»، فلم يكن يكف عن النضال الدائب على صُعد متباينة، إذ وقف بشجاعة ضد «ثقافة الاطمئنان» التي أدمنها كثيرون في مجتمعنا العربي ممن يلوذون بالماضي، ويستهينون بإنجازات العلم الحديث، ويكتفون بترديد الشعارات الجامدة التي تجاوزها الزمن، من دون بحث ولا تمحيص، كما لم يكن ليتوانى - في الوقت نفسه - في مجابهة أولئك الذين تستبد بهم الدهشة من «القشور الثقافية» الآتية من الغرب، عازفين أو عاجزين عن خوض أعماق الثقافة الغربية الحقيقية التي بنت حضارة وحققت تقدما.

ولم يكن الرائد الكبير، في معاركه الفكرية الكثيرة، يتسلح بعلم غزير ورؤية شاملة وعقل ناقد فقط، بل كان كذلك يحمل الكثير الكثير من صبر المحاربين وتواضع العلماء الحقيقيين، وسمو الزاهدين، ونبل الفرسان.

وإذا كان كثيرون في العالم العربي قد خسروا برحيل الدكتور فؤاد زكريا فيلسوفا عظيما، مناصرا للعقل، وداعية للعلم، ومحاربا من أجل تطوير الأمة، ومبشرا بمستقبل مغاير يستند إلى التفكير المنطقي بديلا من النظرة الخرافية للوجود والتاريخ، فإننا في سلسلة «عالم المعرفة» نفتقد بغيابه واحدا من مؤسسي السلسلة، التي ظل مستشارا لها منذ إطلاق عددها الأول في يناير 1978، حتى وفاته، فجعل منها سفيرا ثقافيا للكويت يطوف أرجاء عالمنا العربي الكبير، أول كل شهر، ينشر العلم النافع والثقافة الرصينة والفكر المتجه إلى المستقبل، وليس إلى الماضي.

رحم الله الفقيد رحمة واسعة، وألهم أهله وذويه ومحبيه والسائرين على دربه مزيدا من الصبر والسلوان.

المواد المنشورة في هذه السلسلة تعبر عن رأي كاتبها
ولا تعبر بالضرورة عن رأي المجلس

طُبع من هذا الكتاب ثلاثة وأربعون ألف نسخة

ربيع الاخر 1431 هـ - ابريل 2010

المحتوى

مقدمة

يقــول توماس كارلايــل: «إذا أردت أن تكون خليفــة الله علــى الأرض حقا، فما عليــك إلا أن تكون مبدعــا». وعلى الرغم من أن إبداعات الإنســان في البداية كانت بسيطة متناسبة مع تواضع ظروف الحياة والمعيشــة آنــذاك، فقــد تعاظمت خلال الثــورات الصناعيــة الكبــرى التي حولت مجرى الأمور في العالم، وبدأ على أساسها جنوح الغرب في تصنيــف العالم إلى دول الشــمال الغنية، ودول الجنوب المتواضعة. وقــد كان «وليم جيمــس» محقا حين قال: «الإنســانية لا تفعــل شــيئا، إلا بمبادرات المبدعــين الكبار والصغــار الذين تقلدهم البقيــة منــا، إنها العامــل الوحيد الفاعل في التقدم الإنســاني، فالأفــراد العباقرة يدلون علــى الطريق الصحيــح، ويضعون

«سوف تؤتي الأبحاث العلمية الجارية حاليــا وبكثافة، في دول العالــم المهتمــة بعلــوم وتكنولوجيــا النانو. ثمارها: لتصبــح تلــك التكنولوجيا المتقدمة هي القاسم المشترك في جميع الصناعات وجزءا مهما لا يمكن الاستغناء عنه أو تهميشه»

المؤلف

المخططات التي يتبناها العامة ويجنون ثمارها». وعبقرية المبدعين والمخترعين وإنجازاتهم الخلاقة ليست مجرد وحي يغيب عنه الكد والكفاح، بل هي تفكير إبداعي ممزوج بالكفاح والمثابرة، كما عبر عن ذلك «توماس أديسون» حين قال «العبقرية هي 1 في المائة إلهاما و99 في المائة جهدا وعرق جبين».

الثورات الصناعية الكبرى في تاريخ البشرية

منذ ما يقرب من سبعة آلاف سنة مضت، بدأ الإنسان في ترك حياته البدائية البسيطة، واتجه إلى صنع الحضارة في مجالات مختلفة مثل الزراعة والري وتشييد المساكن وغير ذلك. ونتيجة لهذا، تحول المجتمع البشري تحولا جذريا من كونه مجتمعا بدائيا، ليغدو مجتمعا حكوميا بيروقراطيا تسوده النظم والقوانين

بدلا من الأعراف. ومنذ نهاية القرن السابع عشر إلى وقتنا الحاضر دأب الإنسان في استخدام مصطلح «ثورة Revolution» للتعبير عن التحولات الجذرية في المجتمع، والناجمة عن مخرجات الفكر البشري المتمثل في الابتكار والإبداع التكنولوجي الذي يمس كل نواحي الحياة، بدءا من ثورة المحركات البخارية وقطارات السكك الحديد وصناعة الغزل والنسيج، وانتهاء بثورة الحاسبات والمعلومات، والتكنولوجيا الحيوية، وأخيرا بتفجيره ثورة تكنولوجية جديدة تعرف بـ «ثورة القرن الحادي والعشرين»، وهي تكنولوجيا النانو.

وليس ثمة شك في أن تلك الثورات التكنولوجية المتعاقبة لم تكن إلا حصيلة حصاد متراكم وطويل لخبرات وعلوم وإبداعات وابتكارات أسهمت في زرعها وإنمائها وترسيخ مفاهيمها كل من الحضارتين المصرية القديمة والعربية. وقد امتد طوفان العلم من المنطقة العربية إلى المناطق الإقليمية المتاخمة، وعلى الأخص في قارة أوروبا التي كانت تمر بفترات طويلة حالكة من تاريخها سادها الظلام والظلم والفقر والجهل والمرض. ومع انقشاع عصور الظلام، التي هيمنت على أوروبا في الفترة من العام 525م وحتى العام 1500م، بدأ عصر الإصلاح الديني في اوروبا الذي نادى به

مارتن لوثر (1483 - 1546) ليستنفر بذلك علماء القارة الأوروبية، كي يستفيدوا من مخرجات الحضارتين المصرية والعربية، وليصوغوا حياة جديدة قوامها العلم والتحديث.

وقد استمر العلماء في أوروبا منذ أواخر القرن السابع عشر في جهدهم وتطويرهم، ليمثلوا بذلك قاطرة التنمية المعتمدة على النتاج العقلي للإنسان، مما أدى إلى تحقيق نهضة كبيرة في بلدان القارة التي عانت من التخلف فترة زمنية طويلة امتدت عشرة قرون. وقد قامت الثورة الصناعية الأولى في بريطانيا في العام 1780، حيث أُدخلت أنظمة المحركات البخارية وصناعة النسيج ونهوض فرع الهندسة الميكانيكية. واستمرت هذه الثورة في التطوير والإبداع فظلت مهيمنة على اقتصاد العالم طوال ما يقرب من 60 عاما. وأعقبت هذه الثورةَ ثورةٌ ثانية استمرت أيضا مدة 60 عاما، حيث بدأت في العام 1840 واختصت بمجال السكك الحديد مولدة بذلك صناعة عملاقة هي صناعة الحديد والصلب، مما كان له المردود الاقتصادي الجيد بتنمية رؤوس الأموال، وفي التنمية البشرية على حد سواء. ولم تكن هذه الثورة حكرا على بريطانيا فقط، بل شاركت في تفجيرها دول أوروبية أخرى، منها فرنسا وألمانيا.

ولا شك في أن الثورات التكنولوجية العظيمة تعني زيادة في معدل إنتاج الابتكارات والاختراعات والإبداعات، المعضدة بالقوانين والسياسات المتكاملة لحماية حقوق الملكية الفكرية؛ لذا أدى هذا الإبداع التكنولوجي إلى تزايد ثروات البشر، خاصة بعد إبرام معاهدة باريس في العام 1802 التي أكدت أحقية الإنسان في أن يحتكر ويستثمر مخرجات فكره وإبداعاته العقلية، وكان ذلك بمنزلة البداية الفعلية لترسيخ مفاهيم قوانين حماية الملكية الفكرية وبراءات الاختراع.

ويجيء العام 1900 بعد مرحلة التشبع التي وصلت إليها الثورة الصناعية الثانية، فتنتقل هذه المرة عدوى تفجير الثورات الصناعية غربا إلى الولايات المتحدة الأمريكية، مما يُعد المرة الأولى في التاريخ التي تخرج فيها تلك الثورات الصناعية بعيدا عن بلدان القارة الأوروبية. واختصت الثورة الثالثة بمجالات متعددة مثل المحركات الكهربية، الكيماويات، صناعة السيارات. وإذا كانت الثورات الصناعية بمنزلة عدوى طيبة حميدة تصيب شعوب العالم المتطلعة

إلى الرخاء والتنمية، فلم يكن غريبا أن تشارك الولايات المتحدة الأمريكية دولا أخرى لها أعراق غير أوروبية، مثل اليابان التي تخلت عن سياساتها الاستعمارية، لتشارك في تفجير الثورة الصناعية الرابعة (1950 - 2000) الخاصة بمجالات الكمبيوتر وتكنولوجيا الاتصالات والمعلومات، وصناعة البتروكيماويات، تلك الثورة التي ما زلنا نعيش آثارها حتى يومنا هذا.

وبعد فترة وجيزة من انتهاء الحرب العالمية الثانية، أيقنت الحكومات في جميع أنحاء العالم، وخاصة الولايات المتحدة الأمريكية، أن ضخ الاستثمارات الكبيرة في مجال البحث العلمي يمكن أن يشكل أهمية بالغة في تضخم العائدات والثروات المبنية على الناتج العقلي والعلمي للإنسان، مما يعني فرض مزيد من النفوذ والسلطة على مناطق العالم الأقل تقدما، أو على تلك الدول التي لا تُولي البحث العلمي الاهتمام والرعاية الكافيين. وقد برهنت الثورات الصناعية الكبرى على فشل الاعتماد على نظرية تراكم رأس المال في بناء وتطوير أي مجتمع والارتقاء باقتصاده، لذا فقد أضحى النتاج الذهني للإنسان في الابتكار والاختراع هو الطريق الوحيد لتحقيق التطور والنهوض اقتصاديا واجتماعيا.

وبعد تلك السلسلة من الثورات والانتفاضات العلمية المتلاحقة والتي أدت إلى إحداث ثورات في مجالات الطب والدواء والمواد والطاقة والكمبيوتر وتكنولوجيا المعلومات، تأتي «تكنولوجيا النانو Nanotechnology» التي كثيرا ما يتردد صداها على مسامعنا في هذه الأيام، حيث تؤدي هذه التكنولوجيا المتقدمة الدور الرئيسي الأول في النهوض الاقتصادي المبني على المعرفة، ومن ثم فقد لُقبت باسم «تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين» الذي نحن على مشارف بداية عقده الثاني.

وتوجد تكنولوجيا النانو بالفعل في كثير من الأشياء التي من حولنا بصورة أو بأخرى حيث يتعاظم تطبيق تلك التكنولوجيا الجديدة يوما بعد يوم. وسوف تؤتي الأبحاث العلمية الجارية حاليا وبكثافة، في دول العالم المهتمة بعلوم وتكنولوجيا النانو، ثمارها؛ لتصبح تلك التكنولوجيا المتقدمة هي القاسم المشترك في جميع الصناعات وجزءا مهما لا يمكن الاستغناء عنه أو تهميشه. ففي مجال الصحة والطب، ومع التقدم في تكنولوجيا التشخيص، سوف يتمكن الأطباء من تقديم الرعاية الصحية الكاملة

المتمثلة في الفحص الطبي الدقيق، وذلك بهدف إيجاد الدواء المناسب الذي سوف يصمَّم خصيصا لكل مريض على حدة، وفقا للتركيب الجيني، وذلك بهدف تجنب الآثار الجانبية غير المرغوب فيها. وفي مجال المجتمع والبيئة والطاقة الجديدة والمتجددة سوف تغير تكنولوجيا النانو من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية - مثل البترول والغاز الطبيعي والفحم - إلى مصادر بديلة Alternative Energy متنوعة وغير ضارة بالبيئة مثل الخلايا الشمسية Solar Cells. وكذلك سوف تؤدي الدور الأعظم في تحويل استغلال الطاقات النظيفة المتولدة من طاقات الرياح والأمواج، والطاقة الحرارية الأرضية من حلم راودنا خلال القرن العشرين المنصرم إلى حقيقة وواقع نعيشه خلال السنوات العشر المقبلة من القرن الحالي. وسوف تتيح تكنولوجيا النانو الاستفادة الكاملة والفعالة من الطاقة الهيدروجينية، وذلك باستخدام مواد نانومترية جديدة تتميز بشراهتها البالغة في امتصاص غاز الهيدروجين وتخزينه، مما يعني التقدم في صناعة بطاريات وخلايا الوقود الهيدروجيني. هذا بالإضافة إلى أن تلك التكنولوجيا سوف تمكننا من التغلب على مصادر التلوث ومكافحتها من خلال استخدام أفضل وأكثر فعالية للموارد ومصادر الثروة الطبيعية المتاحة لنا.

وكنتيجة لإعادة هيكلة البنية الذرية Atomic Structure التي توجد عليها المواد وتصغير جزيئاتها وحبيباتها Grain Refining، تُخلَق الآن مواد جديدة تُدعى المواد النانوية Nanomaterials التي تتمتع بخواص وخصال فريدة غير موجودة في المواد التقليدية ذات الجزيئات أو الحبيبات الكبيرة Large Grain Materials، مما يفتح الباب لها، كي تطبَّق في صناعات جديدة ومتقدمة.

ولتكنولوجيا النانو عديد من التطبيقات الواسعة في مختلف القطاعات، مما يعني المزيد من الكفاءة والاستخدام الأمثل للموارد، مؤثرة في ذلك تأثيرا إيجابيا على مواطني المجتمعات المتقدمة من البلدان المؤمنة بدور يؤديه العلم في سبيل تحسين أوضاعها الاقتصادية والاجتماعية. أما تلك الدول المنكوبة بأمراض التخلف عن التحديث التكنولوجي، أو تلك التي لا تتبنى خُططا قومية لتكنولوجيا النانو من الدول النامية، فسوف تكون ضحية للتخلف في المجالات الصحية والبيئية وفي جميع المجالات الأخرى، مما يؤدي إلى

ضعف ثم انهيار في اقتصادها القومي، لتصبح بعد ذلك صيدا ثمينا للدول التي بــدأت منذ فترة وجيزة بناء صروح التكنولوجيا النانوية. وهذا بطبيعة الحال ســوف يؤدي إلى تعزيز وترســيخ الفجوة التكنولوجية، بالإضافة إلى تعميق الفجوة الاجتماعية بين الدول الغنية وبعض الدول النامية.

هذا الكتاب

يتألف هذا الكتاب من ثلاثة أبواب، تحتوي على أربعة عشــر فصلا. ويمثل الباب الأول مدخلا ميســرا لعلم وتكنولوجيا النانو، ويقدم الفصل الأول منه عرضا عاما شــاملا لتلك التكنولوجيا، مســتعرضا نشــأتها، وتطبيقاتهــا المتنوعة فــي المجالات المختلفة، بينما يقــدم الفصل الثاني خلفية ميســرة عن أهمية المواد بالنسبة إلينا، وعن تطور العلوم الطبيعية الذي أدى إلى تغيير مفهومنا عن المادة وخواصها. أما الفصل الثالث، فهو يتحدث عمــا تمثله الذرة والجزيئات من أهمية كبيرة في تحديد صفات العناصــر والمركبــات، وكيــف أن التلاعب بها يؤدي إلــى تغيير في تلك الصفات، ثم يصل الباب الأول إلى نهايته في الفصل الرابع، باســتعراض شامل للمواد التي نستخدمها في حياتنا اليومية، وكيف تطورت.

ويفتتــح الباب الثاني، الذي يدور محــوره حول كيفية الربط بين علم النانــو، وتكنولوجيته، بالفصل الخامس الذي يركــز على المواد النانوية، وتصنيفاتهــا والخواص الفريــدة التي تتمتع بها. وفــي إطار محور هذا الباب، يعرض الفصل الســادس، بكثير من التفصيل والإيضاح، التقنيات المختلفــة المُتبعة فــي إنتاج المــواد النانوية، كما يعرض أيضــا التقنيات الخاصة باختبارات تلك المواد. ونظرا إلى أهمية الكربون ومواده النانوية، مثل أنابيبــه النانوية، في التطبيقات النانو تكنولوجية، فقد خُصصت له مساحة الفصل السابع بأكمله. ويعرض الفصل الثامن نماذج وأمثلة لمواد نانوية متنوعة، موضحا طرق إنتاجها وأهميتها التكنولوجية.

وقد خُصِّص الباب الثالث، الأخير، من الكتاب لعرض ومناقشة بعض من التطبيقــات المبنية على تكنولوجيا النانو، وذلك في مجالات مُختارة، كالطــب والرعاية الصحية (الفصل التاســع)، والزراعة والغذاء (الفصل العاشر)، وحماية البيئة والتصدي لملوثاتها (الفصل الحادي عشر)، ومجال

صناعة الإلكترونيات (الفصل الثاني عشر)، وصناعة الحساسات وأجهزة الاستشعار (الفصل الثالث عشر). ويختتم الكتاب أبوابه وفصوله بالفصل الرابع عشر، الذي يقدم البعد الاجتماعي والاقتصادي لتكنولوجيا النانو، وآثارها الاجتماعية على العالم، مستعرضا المنافسة الشرسة القائمة بين الدول المنتجة لهذه التكنولوجيا، والأنشـطة العلمية والبحثية لها في هذا المجـال، كما يناقش هذا الفصل، المـردود الاقتصادي والاجتماعي لهذه التكنولوجيا المتقدمة وكيفية الاستفادة من مخرجاتها المبتكرة في البلدان العربيـة والدول النامية الأخرى، من أجـل النهوض باقتصادها وتضييق الفجوة التكنولوجية القائمة بين معسـكري دول الشمال المتقدم والجنوب النامـي. ويوضح الفصل كذلك، الموقف الحالـي لدول العالم العربي من تكنولوجيا النانو، وكيف يجب اعتبارها واحدة من الأدوات الاستراتيجية المهمة في دعم وتعزيز خطط التنمية الوطنية.

والكتاب يحوي بين دفتيه الكثير من النتائج البحثية والتطبيقية الخاصة بعدد وافر من العلماء العاملين في مجال تكنولوجيا النانو، على مدار الثلاثين عامـا الماضية. ومن أجل تعميم الفائدة المرجوة من قراءة هذا الكتاب، فقد صيغ بأسلوب سهل مبسط، يتناسب مع القارئ المثقف من خارج التخصص. كما روعي أن يوضح الكتاب أساسيات هذه التكنولوجيا من خلال الاستعانة بكثير من الأشـكال والرسـوم التوضيحية التي تخدم هذا الغرض. وقد تم تجميـع المصطلحات التقنية والفنية الخاصـة بموضوع الكتاب، في صورة معجم مُصغر، جرى إلحاقه ودمجه في نهاية الكتاب.

وأود أن أعـرب عن جزيل شـكري وعظيم امتنانـي وتقديري لكل من شجعني على إنجاز هذا الكتاب، وأخص بالشكر والتقدير السيدة الفاضلة الأسـتاذة الدكتورة فريدة العوضي - الأستاذ بكلية الطب جامعة الكويت، المستشار الأول للمدير العام لمعهد الكويت للأبحاث العلمية، وكذلك السيد الدكتور محفوظ تادرس، والسيد الدكتور عبد المنعم مصطفى، المستشاران الأولان للمديـر العـام لمعهـد الكويـت للأبحـاث العلمية، لتشـجيعهما ومساندتهما المستمرة لي. وخالص الشكر والثناء إلى جميع زملائي بإدارة البيئة، دائرة النظم المتقدمة. كذلك أود أن أشـكر جميع زملائي الباحثين والعاملين بدائرة التكنولوجيا الحيوية، وأخص بالذكر منهم الدكتورة صباح المؤمن، والدكتور محمد بلبع، لعظيم ومفيد مناقشاتهما العلمية المثمرة.

ولا تفوتني فرصة توجيه أعظم آيات الشكر والعرفان لكل من ساهم في صنع عقل وخبرة مؤلف الكتاب، من الأساتذة العلماء الأجلاء بجامعتي الأزهر والقاهرة، وجامعة طوهوكو باليابان.

وأود أن أخص بالذكر الأستاذ الدكتور كينجي سوزوكي Prof. Dr. Kenji Suzuki، العالم الذائع الصيت، الذي تتلمذت على يديه الكريمتين، ثم شرُفت بالعمل تحت قيادته لمعهد بحوث المواد بجامعة طوهوكو باليابان. لقد تعلمت منه كيف يكون العالم متواضعا، خلوقا، محبا لمن معه، متعاونا، فخورا بنفسه وبتخصصه، لا يرتدي إلا حُلته ولا يعمل إلا في تخصصه. وتحية شكر وتقدير للعالم الشهير الأستاذ الدكتور سوميو إيجيما، المُبدع، حاصد الجوائز العالمية، الذي عرفت منه أسس علم وتكنولوجيا النانو، ورأيت في كفاحه العلمي المشرف، النموذج والقدوة لكل باحث طموح.

بقي لي أن أتقدم بخالص آيات الشكر والامتنان، إلى معهد الكويت للأبحاث العلمية، على كل ما يقدمه من دعم وتشجيع دائم لأسرة المعهد الحبيبة، من الباحثين والعاملين، من أجل مواصلة مسيرة المعهد المهمة الرامية إلى دعم وتعزيز الاقتصاد الوطني القائم على العلم والمعرفة.

أما أسرتي الصغيرة - أمي وأبي، زوجتي وأبنائي - الذين تعلمت منهم معاني الحب والتضحية، فتعلقت حياتي بحياتهم، فلهم مني كل الشكر والتحية، على تحليهم بالصبر ومساندتي طوال مشوار حياتي.

وأخيرا، أدعو الله عز وجل أن يكون هذا الكتاب مفيدا وممتعا للقراء الأفاضل، من عشاق سلسلة كتب «عالم المعرفة» المتميزة والمهمة.

والله الموفق،،،

أ. د. محمد شريف الإسكندراني

الكويت

يناير 2010



الباب الأول

مدخل إلى علم وتكنولوجيا النانو

I

النانو بين الحقيقة والخيال

نانو Nano، كلمةٌ صغيرة مكونة من أربعة حروف، تزايد شغف العالم بها في الآونة الأخيرة بعد أن أشرقت في سماء حياتنا اليومية منذ بداية هذا القرن. وقد أدت الاكتشافات الباهرة والتطبيقات التكنولوجية المختلفة والإنجازات المتعلقة بالنانو إلى سطوع نجمها يوما بعد يوم، وسنة بعد أخرى، فباتت أغنية نتغنى بها، بعد أن ظلت طويلا ضربا من ضروب الخيال أو مجرد حلم داعب خيال العلماء، وحرك أقلام مؤلفي قصص أفلام وروايات الخيال العلمي.

«أضحت تكنولوجيا النانو بمنزلة بحر علمي مترامي الأطراف تمتزج مياهه الساخنة بالإنجازات العلمية المثيرة بالمياه العذبة لينابيع العلوم الأساسية والهندسية والطبية وغيرها من أفرع العلم والمعرفة»

المؤلف

ما المقصود بالنانو؟

كلمة النانو هي بادئة منحوتة من اللغة اليونانية القديمة وتعني «قزم Nanos»[1]، وفي مجال العلوم يعني النانو جزءا من مليار

(جزءا من ألف مليون). فمثلا، نانو ثانية (Nanosecond، وحدة لقياس الزمن وتُختصَــر لتصبح Nano Sec) تعني «واحدا على مليــار من الثانية الواحدة». وبالمثل، يستخدم النانومتر Nanometer، الذي يختصر بالحروف اللاتينية إلى nm، كوحدة لقياس أطوال الأشـياء الصغيرة جدا التي لا تُرى إلا تحت المجهر (الميكروســكوب) الإلكتروني. وتُســتخدم هذه الوحدة للتعبير عن أبعاد أقطار ومقاييس ذرات وجزيئات المواد والمركبات والخلايا والجسـيمات المجهرية مثل البكتيريا والفيروسات. والنانومتر الواحد يساوي جزءا من ألف مليون (مليار) جــزء من المتر، أو بتعبيــر آخر، فإن المتر الواحد يحتــوي على مليار جزء من النانومتــر (2). وللمقارنة، فإن النانومتر الواحد يعادل قياس طول صف مكون مــن 13 ذرة من ذرات غاز الهيدروجين (3) إذا ما تخيلنا أنها وُضعت متراصة بعضها بجوار البعض، كما هو مبين في الشكل (1 - 1).



الشـكل (1 - 1) : رسـم تخطيطي يوضـح صفـا أفقيـا مكونـا مـن 13 ذرة مـن ذرات الهيدروجـين البالـغ قطر الواحدة منهـا 0.75 نانومتر. افترض وضعهـا بعضها بجوار البعـض. وكما هو مبين في الشـكل، فـإن مجموع مقاييس أقطار هذه الـذرات المتجاورة يبلغ نانومترا واحدا (4).

ولبيان وحدة النانومتر المستخدمة في قياس أبعاد أطوال الأشياء الصغيرة جدا، وإدراك مدى تناهي صغر أحجام ومقاييس الأشـياء التي يمكن التعبير عنها باستخدام هذه الوحدة، لعل من المُجدي أن أدعو القارئ الكريم لإلقاء نظرة سريعة على صور بعض الأشياء المعروفة لنا، والتي تتباين أبعادها وأحجامها، كما هو موضح في الشكل (1 - 2) فعلى سبيل المثال، إذا ما أردنا قياس قطر شــعرة واحدة من شعر الإنسان، فسنجد أنه يتراوح بين 60 و120 ميكرومترا (الميكرومتر، هو وحدة لقياس أطول الأشياء الصغيرة، ويساوي جزءا من مليون جزء من المتر الواحد، وهذا يعني أن الميكرومتر الواحد يساوي 1000 نانومتر)، أي أن قطر شعرة الرأس يعادل 60000 إلى 120000 نانومتر. هذا بينما يبلغ

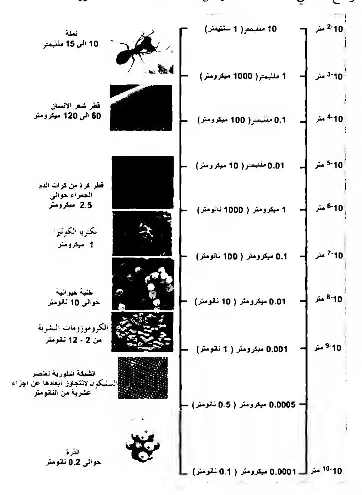
قطر كرة من كرات الدم الحمراء للإنســـان نحـــو 2.5 ميكرومتر أي ما يعادل 2500 نانومتر، بينما يبلغ مقياس أطوال بكتيريا الكوليرا نحو 1 ميكرومتر وهو ما يعادل 1000 نانومتر.

الميكرو والنانو

من الجدير بالملاحظة، أنه قبيل انطلاق ثورة تكنولوجيا النانو في بداية هذا القرن، انصب اهتمام الصناعات الكهربية والإلكترونية على كيفية تصغير المواد المســتخدمة في منتجات ومخرجات هذه الصناعات إلى مســتوى الميكرومتر، وذلك بعد أن أدركــوا أهمية تصغير مكونات الأجهزة الإلكترونية لإنتاج أجهزة أصغر حجما، وأعلى جودة وكفاءة، وأرخص ســعرا. ومن ثم، بات العالم يتغنى بالميكرومتر الذي اســتنبطت أو اســتُوحيت منه كثير من الألفاظ اللغوية التي لم يكــن لها وجود قبــل ذلك الحين؛ مثل الميكروســكوب، الكائنــات الدقيقة Microorganisms، الميكروويف، الميكروفون. وغير ذلك من المصطلحات التقنية الشــهيرة المرتبطة بوحدة الميكرومتر. هذا وقد أيقن عالم صناعات الحواسب والهواتف النقالة وغيرها من الأجهزة الإلكترونية المتقدمة أن الشرائح والرقائق الإلكترونيــة الميكرومترية قد وصلت إلى أقصى قدرتها، ولن يكون في الإمكان إنتاج شرائح أكثر تقدما بحيث تحتوي على أضعاف الترانزستورات الموجودة إلا إذا صُغِّرت المكونات المؤلفة للترانزستورات إلى ما هو أدنى من الميكرومتر. وقد أدى التمكن من تصغير مكونات الترانزستورات لمستوى النانو إلى تضاعف كبير في ســرعة وكفاءة الحواســب، وزيادة قدراتها في تخزين المعلومات والبيانات، وأدى ذلك أيضا إلى تصغير أحجامها والنزول بأسعارها، مما كان له أبلغ الأثر في انتشارها على النحو الذي نراه اليوم.

وبالمثل فقد تطورت صناعة الهواتــف النقالة وأصبحت أقل حجما ووزنا وأكثــر كفاءة، فــزادت قدراتها فــي تخزين وحفظ البيانــات والمعلومات إلى أضعاف ما كانت عليه في فترة التســعينيات مــن القرن الماضي. وقد أصبح ذلك حقيقة نلمســها الآن بعد أن صُغِّرت مكوناتها الإلكترونية إلى مســتوى النانو، فأضحت أكثر سرعة، مما أهلها لأن تؤدي أدوارا وظيفية متعددة، مثل الدخول إلى الشبكة العنقودية، إرسال واستقبال الرسائل الإلكترونية، معالجة

الصور والوسائط البصرية والسمعية، استخدامها في معالجة البيانات والأشكال وكتابة التقارير والرسائل، فأضحت بهذا حاسبا آليا محمولا في جيوب ملابسنا. هذا وقد وُظِّفت حديثا تلك الهواتف النقالة كمساعدات رقمية شخصية Personal Digital Assistance، PDA، وإدخال نظام تحديد المواقع العالمي GPS ، Global Positioning System عليها.



الشكل (1 - 2) : مقارنة بين مقاييس أبعاد عدد من الأشياء المعروفة لنا مُقدرة بوحدات قياس أطوال مختلفة، المتر، السنتيمتر، الملليمتر، الميكرومتر والنانومتر [4].

المواد النانوية

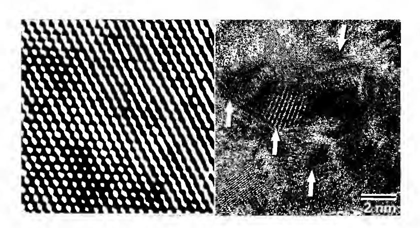
يمكننا تعريف المواد النانوية Nanomaterials بأنها تلك الفئة المتميزة من المواد المتقدمة التي يمكن إنتاجها بحيث تتراوح مقاييس أبعادها أو أبعاد حبيباتها الداخلية بين 1 نانومتر و100 نانومتر، كما هو مبين في الشكل (1 - 3). وقد أدى صغر أحجام ومقاييس تلك المواد إلى أن تسلك سلوكا مغايرا للمواد التقليدية كبيرة الحجم التي تزيد أبعادها على 100 نانومتر، وأن تتوافر بها صفات وخصال شديدة التميز لا يمكن أن توجد مجتمعة في المواد التقليدية. وتُعد المواد النانوية هي مواد البناء للقرن الحادي والعشرين ولبناته الأساسية والركن المهم من أركان تكنولوجيات القرن الحادي والعشرين (تكنولوجيا النانو، التكنولوجيا الحيوية، تكنولوجيا المعلومات والاتصالات) والتي تُعتبر معيارا لتقدم وحضارة الأمم ومؤشرا لنهضتها.

وتلقي الفصول التالية لهذا الفصل، مزيدا من الضوء على تلك المواد، وطرق تحضيرها وتوظيفها في التطبيقات المختلفة.

هذا، وتتنوع المواد النانوية من ناحية المصدر، حيث تختلف باختلاف نسبها، كأن تكون مواد عضوية أو غير عضوية أو مواد طبيعية أو مُخلقة. هذا وتُعد جميع أنواع المواد الهندسية المعروفة مثل العناصر الفلزية وسبائكها Metal and Metal Alloys، أشباه الموصلات Semiconductors، والأكاسيد والمعادن Oxides and Minerals، وكذلك البوليمرات Polymers تعد بمنزلة المواد الأولية التي تعتمد عليها تكنولوجيا النانو في تحضير وإنتاج المواد والأجهزة النانوية. وتمنح المادة الصفة «النانوية» إذا ما كانت مقاييس أحد أبعادها - بعد واحد على الأقل - ما دون 100 نانومتر.

وتتأثر جميع الأنظمة، سواء كانت أنظمة بيولوجية أو كيميائية أو فيزيائية بالتغييرات التي تطرأ على أبعاد وأحجام المواد، بل ويمتد هذا التصغير ليهيمن على النمط الذي تسلكه هذه المواد النانوية في التفاعلات الكيميائية والبيولوجية المختلفة. فعلى سبيل المثال فإن حواجز الدم الواصل للمخ Blood-Brain Barrier المكلفة بصدّ وحجز أي أجسام

غريبة من أن تصل إلى المخ من خلال الدورة الدموية، تقف عاجزة عن منع جسيمات المواد النانوية من أن تصل إلى المخ، على الرغم من أن نظام الحجز أو المنع هذا يعمل بكفاءة مع الأجسام الكبيرة نسبيا التي تصل أحجامها إلى عدة ميكرومترات، لذا فقد استُفيد من هذه الظاهرة في تخليق عقاقير وجسيمات دوائية تصل مباشرة إلى المخ بهدف توصيل الدواء إليه أو إزالة تجلط دموي به من دون أن يتم اعتراضها أو حجبها. إذن نستطيع القول إن صغر أحجام هذه المواد النانوية قد أهلها لأن تخدع حواجز الدم الواصل إلى المخ، وأن تتسلل من خلالها كي تصل إلى الهدف وتتعامل معه تعاملا مباشرا.



الشكل (1 - 3) : توضح الصورة التي على يمين الشكل صورة مأخوذة بواسطة الميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة High-Resolution Transmission Electron Microscope، HRTEM لعينة مؤلفة من مجموعة حبيبات نانوية لسبيكة فلزية من سبائك الزركونيوم - نيكل - ألومنيوم $Zr_{60}Ni_{25}Al_{15}$ تم تحضيرها بواسطة مؤلف هذا الكتاب مع فريق عمله في العام 2003. ويلاحظ بالشكل أن أبعاد أقطار الحبيبات المشار إليها بالأسهم لاتتجاوز 3 نانومترات. وتوضح الصورة التي على اليسار مدى الاتساق والترتيب الذري الداخلي لحُبيبة من تلك الحبيبات (5).

لا شك في أن تلك الصفات والخواص غير المسبوقة قد أهلت المواد النانوية لاعتلاء قمة هرم المواد الجديدة، فأصبحت قاسما مشتركا في الصناعات والتطبيقات المختلفة، حيث تعاظم تأثيرها منذ أوائل

هـــذا القرن لتمثل ثـــورة تكنولوجية أطلق عليها اســـم تكنولوجيا النانو Nanotechnology. وتوظف المـــواد النانوية في مختلف المجالات، مثل مجال الطب وصناعة الأدوية والعقاقير الطبية، مجال العلاج والفحص الطبـــي، وكذلك في مجال الحفاظ على البيئة ومعالجة الملوثات البيئية وإزالتها. ويمتد توظيف المواد النانوية لتدخل في صناعة مكونات أجهزة الحاســـبات الآلية، الإلكترونيات والحساســـات Sensors الدقيقة. هذا بالإضافة إلـــى دخولها في صناعة الأدوات المختلفـــة والمعدات الثقيلة والخفيفة على حد ســـواء. ويعد مجال الطاقة الجديدة والمتجددة أحد أهم المجالات المســـتفيدة، حيث يتحقق الاعتماد على المواد النانوية في تصنيع الخلايا الشمسية Solar Cells وبطاريات الوقود Fuel Cells.

ماهية التكنولوجيا؟

أضحى لفظ «تكنولوجيا» من الألفاظ الأكثر شـــيوعا وتداولا من قبـــل رجل الشـــارع العادي بجميـــع فئاته وشـــرائحه، وعلى اختلاف خلفياتـــه وثقافاتـــه، وذلك منذ نهاية الحـــرب العالميـــة الثانية قبيل ســـنوات قليلة من بداية منتصف القرن العشـــرين وحتى يومنا هذا. وعلـــى الرغم من هلامية المعنى ومطاطيتـــه، فإنه أصبح معيارا عند رجل الشـــارع ليقيس به مدى تقدم الدول وقوتها، ومؤشرا على متانة اقتصادهـــا وهيمنتهـــا على مجريـــات الأمور في العالم وسياســـاته وتطويعها وفقا لمصالحها وأمانيها، ومن ثم، فقد اكتســـى هذا اللفظ فـــي كثير من الأحيان معاني أخـــرى تختلف في كثير من الأحيان عن المعنى الأساســـي المراد له.

وفي غياب تعريف محدد للفـــظ «تكنولوجيا» ونتيجة للتداول الخاطئ للفـــظ، فقد يظن البعـــض أن العالم لم يعـــرف التكنولوجيا إلا من خلال تلك الإنجازات العلمية العملاقة والتطبيقات الحديثة التي شهدها عالمنا خلال الســـتين عاما الماضية، مثل التكنولوجيا الحيوية Biotechnology، تكنولوجيا هندســـة المكونات الوراثية Genetic Engineering، تكنولوجيا الاتصالات والمعلومات Communication and Information Technology،

التكنولوجيات الدقيقة Micro-technologies، وتكنولوجيات الإلكترونيات الدقيقة Micro-electronics، وأخيرا تكنولوجيا النانو Nanotechnology، وهذا مخالف للحقيقة.

وإذا ما اتفقنا على أن التكنولوجيا بمعناها المبسط تعني مجموعة المهارات والتقنيات الرامية إلى تطويع النظريات وتطبيق نتائج البحوث العلمية من أجل وضع حلول فريدة ومتميزة لمشكلة ما، أو الحصول على منتجات حديثة قائمة على النتاج العقلي والذهني للإنسان، فسوف يتضح لنا من هذا التعريف، أن التكنولوجيا كظاهرة ليست جديدة أو حديثة، فلقد طوّع الإنسان منذ وجوده على سطح هذا الكوكب الكثير من تجاربه ونتاج خبراته العملية، التي تطورت بعد ذلك لتكون مخرجات تعتمد على العلم والتجريب، لإيجاد حلول فريدة تمثلت في تشييده للمأوى وتوظيفه أدوات بدائية فعالة لتنفيذ أعماله. هذا بالإضافة إلى تمكن الإنسان من استخراج المعادن من تحت سطح الأرض وتجهيزها ثم تخليصها من الشوائب العالقة بها أو الداخلة في تركيبها، ثم تمكنه من الحصول على مسبوكات فلزية وذلك عن طريق الصهر، ثم تشكيلها في صور مختلفة تناسب كل تطبيق على حدة، وإلى غير ذلك من استخدامات مهمة كانت السبب في تمكن الإنسان من التغلب على الصعاب والمشاكل اليومية التي واجهته على مدار ما يقرب من مليون سنة هي عمره على كوكب الأرض. إذن فظاهرة التكنولوجيا في حد ذاتها ليست بجديدة وإنما الجديد فيها هو اللفظ فقط وهذا على النقيض من المفهوم المُترسخ عند البعض [6].

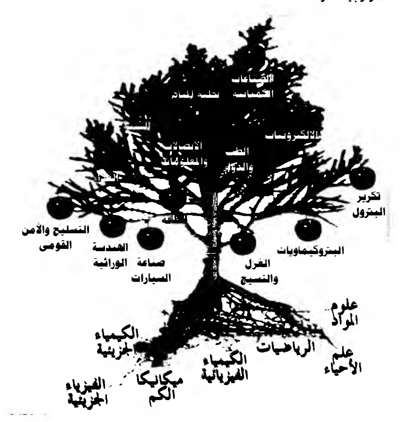
علم النانو وتكنولوجيا النانو

ربما لم تحظ أي تكنولوجيا سابقة باهتمام وترقب كمثل الذي حظيت به تكنولوجيا النانو Nanotechnology التي تعد وبحق تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين، والمفتاح السحري للتقدم والإنماء الاقتصادي المبني على العلم والمعرفة [7].

ويُقصـــد بعلم النانو Nanoscience ذلك العلم الذي يعتني بدراســـة وتوصيف مواد النانو وتعيين خواصها وخصالها الكيميائية، الفيزيائية، والميكانيكية مع دراسة الظواهر المرتبطة الناشئة عن تصغير أحجامها. وغني عن البيان أن تصغير أحجام ومقاييس المواد إلى مستوى النانومتر ليس هدفا في حد ذاته، بل هو فلسفة علمية راقية وانقلاب نوعي وعلمي على كلاســيكيات وثوابت النظريات الفيزيائية والكيميائية، يهدف إلى إنتاج فئة جديدة من المواد تُعرف باسم المواد النانوية لتتناسب خواصها المتميــزة مع متطلبات التطبيقــات التكنولوجية المتقدمة في هذا القرن وتعزيز الأداء على نحو فريد غير مسبوق [8].

وبينمــا يبدو تعريف علم النانو أمرا ســهلا، فــإن وضع تعريف محدد لتكنولوجيا النانو يعد أمرا أكثر صعوبة، وذلك نظرا لتشــعبها ودخولها في المجالات التطبيقية المختلفة، حيث إن كلا من هذه المجالات ينظر إلى هذه التكنولوجيــا من وجهة النظــر الخاصة به. وعامة، فــإن تكنولوجيا النانو يمكــن تعريفها بأنها تلك التكنولوجيا المتقدمة القائمة على تفهم ودراســة علــم النانو والعلوم الأساســية الأخرى تفهما عقلانيــا وإبداعيا مع توافر المقــدرة التكنولوجية على تخليق المواد النانوية والتحكم في بنيتها الداخلية عــن طريق إعادة هيكلة وترتيب الذرات والجزيئات المكونة لها، مما يضمن الحصول على منتجات متميزة وفريدة تُوظف في التطبيقات المختلفة [9].

وبهذا أضحــت تكنولوجيا النانو بمنزلة بحر علمي مترامي الأطراف تمتزج مياهه الســاخنة بالإنجازات العلميــة المثيرة، بالمياه العذبة لينابيع العلوم الأساسية والهندسية والطبية وغيرها من أفرع العلم والمعرفة. ولم تكــن لتكنولوجيا النانو أن تبلــغ ماوصلت إليه اليوم إلا من خلال اختراع وابتــكار عدة تقنيات فريدة كان من شــأنها أن تُمكن تلــك التكنولوجيا من التحكم في البنية الجزيئية Molecular Structure والتلاعب بذرات المادة وتصميمها وفقا للغرض التطبيقي المراد. وانطلاقا من هذا المفهوم، فــإن تطبيقات تكنولوجيا النانو لا تقتصر على فرع واحد بعينه من أفرع العلــوم أو الهندســة أو الطب، بل تمتد تطبيقاتها لتشــمل جميع الفروع والتطبيقات (الشكل 1 - 4).



الشكل (1 - 4) : ينتسب علم وتكولوجيا النانو في جذوره إلى العلوم الأساسية التي أنبتت جذعه الذي منه تفرعت أغصانه المثمرة لتظلل كل التطبيقات المختلفة [4].

يخطــئ من يتصــور أن تكنولوجيا النانو هي مجرد أداة أو وســيلة للحصول على مُنتج متميز! ولعل من الإنصاف أن نعترف بأنها أرقى من هذا بكثير، فكما ذكرنا من قبل أنه في غياب تلك التكنولوجيا وتقنياتها مــا كان لنا أن نحقق تلــك الطفرات الجبارة والقفــزات العملاقة في دنيا عالم الاتصالات والمعلومات وما كان لنا أن نتبحر لنســبح في المياه

العميقة للهندسة الوراثية والتكنولوجيا الحيوية. في غياب تكنولوجيا النانو لم يكن للعالم أن يحقق تلك الإنجازات المتلاحقة في عالم الطب والدواء ومكافحة السرطان ودحره في مرقده، كما لم يكن مُمكنا لنا أن نطوع ذرات المواد الكيميائية لأن تبحر خلال الشرايين الدموية متخذة في ذلك قواربها من كرات الدم الحمراء حتى تصل إلى الخلايا العليلة في الجسم، كي تقدم لها الأمل والعلاج، لم يكن في استطاعة العالم أن يتحدث عن إمكان توظيف الخلايا الشمسية والمواد النانوية المخزنة لغاز الهيدروجين في مجال توليد الطاقة الشمسية وتصنيع بطاريات الهيدروجين لولا تلك الوثبات التكنولوجية الرائدة التي سخرتها لنا تكنولوجيا النانو في مجال الطاقة الجديدة والمتجددة. هل كان لنا أن نستخدم تلك الأجهزة الصغيرة المحمولة بين كفوف أيدينا والتي بها نستطيع تحديد مكاننا وإحداثياته وتهدينا لسلوك الطريق الصواب خلال رحلاتنا في الطائرات والسفن والسيارات؟ هل كان للبشرية أن تنعم بشرب مياه عذبة نقية خالية تماما من الأملاح والشوائب والبكتيريا لولا استخدام المُرشحات النانوية المنقية المياه؟ وماذا عن تنقية المياه الجوفية من السموم الكيميائية لمخلفات الأسمدة بواسطة المواد النانوية؟

نبذة تاريخية

خمسون سنة في طريقها للمضي على صيحة عالم الفيزياء الأمريكي الشهير البروفيسور ريتشارد فينمان Richard Feynman بأن « هناك متسع كبير في القاع! There's plenty of room at the bottom». كانت هذه الصيحة عنوانا لمحاضرته التاريخية التي ألقاها في حفل أقامته الجمعية الأمريكية للفيزياء في مساء ليلة باردة من ليالي شهر ديسمبر 1959[10]، وفي حضور كوكبة من علماء الفيزياء الذين أتوا خصيصا لحضور تلك الاحتفالية المقامة تكريما له ولمجمل أعماله الإبداعية الأصيلة في علوم ميكانيكا الكم التي نال عنها جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1965.

وقد أبــدع فينمان في محاضرته حيث أعطــى تصورا ثاقبا خلاقا ينبئ عن إمكانية تغيير خواص أي مادة وتعظيم سماتها، وذلك عن طريق إعادة ترتيب ذراتها بالشكل الذي يتأتى معه الحصول على تلك الخواص المتميــزة والمختلفة تماما عن ســماتها الأصيلة قبل إعادة هيكلتها. وقد أرجع إيمانه هذا إلى العلاقة المباشــرة التي تربط بين بنية Structure المادة وخواصها، ســواء كانت هذه الخواص خواص كيميائية تتعلق مثلا بالنشــاط الكيميائي، أو خواص فيزيائية مثل اللون والشفافية. أيضا، فإن الخواص الميكانيكية لأي مادة مثل الصلابة والمرونة وغيرهما تعتمد كذلك على البنية الداخلية للمادة وأماكن وجود ذراتها وعددها بشبكتها البلورية Crystal Lattice.

وعلى الرغم مما انفردت به تلك المحاضرة من تنبؤات مثيرة أشارت إلى قرب تفجير الإنسان لثورة تكنولوجية جديدة تُضاف إلى سجله من الثورات الصناعية، فإن ما أشار إليه فينمان لم يلق في حينه الترحيب المُنتظر، حيث وُصف منهاجه بأنه مجرد خيال علمي يتفوق فيه الجانب النظري على الواقع العملي (7). وقد استند العلماء آنذاك إلى ما انتهوا إليه من أن تحريك ذرات أي مــادة، والتي تتضاءل أطوال أقطارها إلى ما دون النانومتر الواحد، يُعد أمرا مســتحيلا، وذلك نظرا إلى عدم توافر الوســيلة أو الأداة بالغة الصغر التي نســتطيع بواســطتها التقاط الذرات والتلاعب بهــا Manipulation لتحريكها من مواضعها الأصلية إلى مواضع أخرى، ثم دمجها مع ذرات لمواد أخرى لتكوين شــبكات بلورية من مواد نانوية الأبعاد متميزة الخواص عالية الأداء. وأزعم أن البروفيسور فينمان نفسه لم يكن يتوقع أنه بمحاضرته تلك قد أطلق الشــرارة الأولى لتفجير ثورة القرن الحادي والعشرين التي لقبها العالم الياباني نوريو تانيغوتشــي Norio Taniguchi في العام 1974 بلقب تكنولوجيا النانو Nanotechnology لتتوج بذلك كتكنولوجيا التصنيع الأولى للقرن الحادي والعشرين وكمعيار يقاس به تقدم الأمم.

وليس ثمة شــك في أن تلك المحاضرة قد تركت وراءها أسئلة كثيرة ومنطقية فرضت نفســها علينا، وذلك نظرا إلى ثقل وزن البروفيســور فينمان ومكانته العلمية المرموقة. وقد تمكن العالمان الفيزيائيان هنريتش

روهرر «Heinrich Rohrer وزميلــه بيننغ Gerd Binning»، الحاصلان علــى جائزة نوبــل في الفيزياء العـــام 1986 والعاملان بشـــركة IBM الأمريكية بفرع زيورخ بسويسرا، في العام 1981 من التوصل إلى اختراع نوع جديد من الميكروســكوبات المعتمدة على المسح البحثي لذرات المادة وهو الميكروسكوب النفقي الباحث Scanning Tunneling Microscopy، حيث تمكنا به من التعامل المباشــر مع الذرات الأحادية للمادة وتحديد أبعادهــا الثلاثية، وذلك عن طريق إبرة دقيقــة التركيب والأداء زُود بها هذا الميكروسكوب تســتطيع من خلال تطبيق شحنات إلكترونية سالبة استشعار الذرات الموجودة على الأسطح الخارجية للعينة المُراد توصيفها وتحديد شــكل وترتيب ذراتها (الشــكل 1 - 5)، ونُشر العمل كاملا بعد ذلك في العام 1986 (11).

وأســتطيع القول هنا، إن هــذا الإنجاز العلمي الكبيــر قد أثلج صدر البروفيسور فينمان حيث أثبت صحة نظريته ووضع منتقديه من المتشككين فــي افتراضياته الرائدة في حرج بالغ، خاصة بعد أن تمكن البروفيســور «إرك دريكســلر Eric Drexler» في العام 1981(12) من نشــر أول ورقة بحثيــة في موضــوع يتعلق بتطبيقــات تكنولوجيا النانو بعــد جهد بحثي ومعملي متواصل استمر أربع سنوات متواصلة.

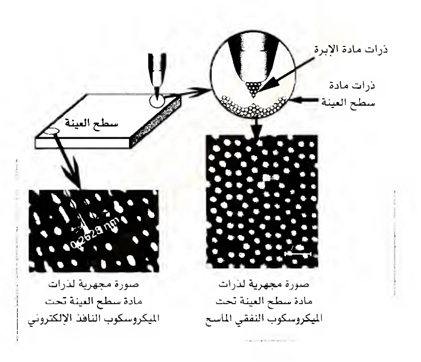
وكــم كنت أود أن يــرى فينمان، الذي تُوفي فــي العام 1988عن عمر يناهز الســبعين عاما، التجربة المثيرة الأولى من نوعها التي قام بها فريق بحثي بشــركة IBM في العام 1989 حين وظفوا الإبرة الدقيقة الموجودة بالميكروســكوب النفقي الماســح لالتقاط ذرات عنصــر «الزينون» الخامل وتحريكها بدقة متناهية لإعادة ترتيبها واحدة تلو الأخرى على سطح بارد من فلز النيكل، لتشــكل معا شــعار الشــركة مكتوبا بحروف قوامها ذري وأبعادها نانوية (الشــكل 1 - 6)!. ولعل نجاح هذه التجربة الرائدة، التي جاءت بمنزلة اعتذار عملي للبروفيسور فينمان عما ناله من نقد لاذع، قد فتحت البــاب لدخول العالم إلى عصر تكنولوجيا النانو والبدء في تصنيع أجهزة وأدوات لا تتجاوز أحجامها بضعة نانومترات، ولتتحقق بذلك نبوءة فينمان وتتأكد نظريته.

تكنولوجيا النانو، هل هي حقا تكنولوجيا حديثة؟

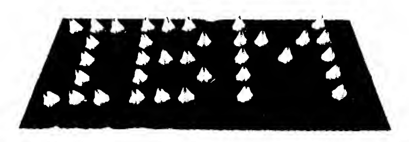
قد يندهش القارئ الكريم إذا ما علم أن استخدام المواد النانوية في بعـض التطبيقات يرجع إلى عدة مئات من السـنين، خاصة في مجال تحضيـر وتوصيف المركبـات الكيميائية، وذلك نظـرا إلى أن مقاييس وأبعـاد كل الجزيئـات Molecules المكونة للمركبـات الكيميائية تكون في مسـتوى النانو! وقد تناول عالم الفيزياء والرياضيات الأكثر شهرة ألبرت آينشتاين Albert Einstein في جزء من برنامجه العملي برسالة الدكتـوراه منذ ما يقرب مـن مائة عام كيفية انتشـار وذوبان جزيئات السـكر في الماء، حيث تمكن من حسـاب أبعاد جزيء واحد من السكر ووجـد أنه لا يتعدى النانومتر الواحد. هذا الاكتشـاف على الرغم من أهميته، لم يعد مثيرا في حد ذاته في مرحلتنا الحالية التي نعيشها اليوم حيث تم التعرف على أبعاد الجزيئات المكونة للمادة، وكذلك تم التعرف على كل الخلايا الحيوانية والنباتية والفيروسات والبكتيريا والجسيمات الدقيقة، وأدركنا تماما مدى تدنيها في الحجم إلى مسـتويات أقل من 100 نانومتـر. والقـارئ الكريم الـذي أُتيحت له فرصـة زيارة بعض الكنائس الموجودة بالبلدان الأوروبية، المنشأة في القرون الوسطى، ربما يكون قد شاهد نوافذ الزجاج الملُون Stained Glass Window الموجودة بها، والـذي تتداخل فيه حبيبات نانوية من فلـز الذهب الحر بأقطار مختلفـة المقاييس. وكما هو معروف، فإن اختلاف طول قطر كل حبيبة مـن حبيبات فلز الذهـب يُعطي لونا مغايرا وفقا لظاهرة التشـتت أو التكسـير الضوئي Light Scattering لسـطح المادة، الذي يتسبب في كسـب المادة للون الذي نراها عليه. لذا فإن ألوانها الظاهرة لنا تتدرج من الأصفر إلى البرتقالي إلى الأرجواني ثم إلى الأحمر والأخضر وفقا لطول أقطار حبيباتها.

وإذا كان الأمـر هكذا فمـا الجديد أو الفريـد إذن؟ الإجابة عن هذا السـؤال تكمن في أن ما قام به العلماء السـابقون لنـا، وعلى الرغم من إبداعاتهـم العلمية، كان مجرد رصد لظاهرة معينـة أو ملاحظة ارتباط

ظاهرتين أو أكثر كل منهما بالأخرى. أما اليوم فإننا لا نكتفي فقط بدراسة تأثير صغـــر الحبيبات المكونة للمادة على الخـــواص المختلفة لها، وإيجاد التفســـيرات والتبريرات العلمية لهذا الارتباط الوثيق فقط، بل لقد انتقلنا بالفعل إلـــى مرحلة جديدة ومهمة، وهي القدرة علـــى إنتاج وتصنيع مواد وأجهـــزة نانوية متقدمة يتم توظيفها في كل المجالات التطبيقية. وكل هذا في الأســـاس يرجع فضله إلى علمائنا الأوائل الذين سبقونا في الملاحظة وفي بعض التطبيقات.



الشكل (1 - 5) : رسم توضيحي يبين الإبرة الإلكترونية المزود بها الميكروسكوب النفقي الماسح STM والتي تحدد بواسطتها أشكال وأحجام الذرات للمواد المختلفة. وهذه الإبرة تستخدم كذلك في تحريك وترتيب ذرات المواد المختلفة والتحكم في بناء شبكاتها وفقا للغرض المطلوب وللخواص المرجوة منها بعد إعادة هيكلتها (11، 13).



الشكل (1 – 6): شعار شركة IBM مكتوبا بذرات لعنصر الزينون المترسبة على سطح شريحة فلزية من النيكل [14].

إذن وكما سبق أن أشرنا إليه، فإن تصغير حجم وأبعاد الحبيبات المكونة لبنية أي مادة ليس هدفا أو غاية في حد ذاته، بل هو وسيلة وسبيل لتحسين الخــواص المختلفة للمادة تمكننا من توظيف التأثير الكمي المُكتســب لدى تلك المواد النانوية، والذي يتعاظم بتدني صغر حبيباتها ليهيمن على سلوكها ويعمل على تحســين صفاتها وخواصها البصرية والكهربية والمغناطيسية وجميع الخواص الأخرى بشكل متميز وغير مسبوق.



2

المادة: اللبنة الأولى للحضارة الإنسانية

«لأن كل هـذه الثورات وتلك النجاحات المتواصلة قد تفتقت عن تطبيقات المواد، فلم يكن غريبا أن تشغل المادة الحيز الأكبر من تفكير الفلاسفة قبل أن تشغل عقل وفكر العلماء والباحثين، وذلك لكونها تمثل العالم المادي المحسوس لدينا»

المؤلف

على الرغم من أن هذا الكتاب وُضع كي يتناسب مع القارئ المُثقف المهتم بمتابعة الصيحات الأخيرة في دنيا التكنولوجيات المتقدمة وتطبيقاتها المثيرة والنافعة دون الدخول في التفاصيل الدقيقة لها، فإنه قد يكون من المفيد أن أقدم للقارئ في بداية هذا الكتاب استعراضا عاما ومراجعة سريعة على الأسس والمبادئ العلمية التي تأسس عليها علم النانو، وقامت عليها تكنولوجيته. لذا كان لزاما عليّ أن أقدم اعتذاري للقارئ الكريم الذي ربما كان يتوقع أن يبدأ الفصل الأول من هذا الكتاب في الإبحار مباشرة في محيط التطبيقات العملية لتكنولوجيا النانو. معذرة عزيزي القارئ إن كنت قد جنحت لما حدثتني إليه نفسي في

أن أسـطر هذا الجزء من الكتاب باسـتعراض عام وشامل لماهية المادة ومفهومهـا عبر التاريخ، وكيف تطورت بنا الحـال إلى إنتاج العديد من المواد الهندسـية Engineering Materials سواء التقليدية Traditional منها أو المتقدمة Advanced والتعرض لما تلعبه ذراتها في تحديد خواص وسمات المادة.

وأود أن أؤكد أنني لم أهدف على الإطلاق إلى الإطالة، أو إلى خلق نوع من التشـويق، بل كانت غايتي هي أن يشـاركني القارئ العزيز في اسـتعراض التطور التاريخي والفلسـفة في إنتاج وصناعة المواد، منذ العصر الحجـري وحتى عصر النانو. أتمنى أن أكون قد نجحت في أن أضع بين يديك خلفية مبسطة عن خواص واستخدامات الأنواع المتعددة من المواد، التي تعد خامات وأحجار بناء صرح تكنولوجيا النانو العظيم، علـى الرغم من إيماني بأن قراء هذه السلسـلة المتميزة من كتب عالم المعرفة تتوافر لديهم تلك المعلومات بصورة أو بأخرى. وكل ما أعدك به أيهـا القارئ الكريم ألا نطيل في رحلتنا هذه وألا نبحر إلى مياه العلوم الأساسية العميقة، بل سوف تكون رحلتنا سريعة - آمل أن تكون ممتعة ومفيدة - من خلال فصول هذا الجزء الأول من الكتاب الذي أعتبره - إن جاز لـي التعبير - مفتاح علم النانو وتكنولوجيته القائمة على ذرات المادة وجزيئاتها.

بقي لنا أن نسـأل هنا عن ماهية القوانـين الفيزيائية التي تخضع لها المواد النانوية وتسلك دربها؟ هل تتبع حركة تلك المواد نُظم وقواعد الحركة الكلاسيكية للمادة التي رسـخها العالم الشهير نيوتن، أم أنها تدور في فلك المفاهيم الفيزيائية الحديثة التي أسسـها ماكس بلانك قبيل انتهاء السـنة الأولى من القرن العشـرين بثلاثة عشر يوما؟ وإذا كانـت المواد النانويـة تخضع لقوانين الفيزيـاء الحديثة التي أدت إلى انطلاق ثورة الفيزياء الكبرى، فالسـؤال هنا يبرز حول ماهية الأسباب الجوهرية التي أدت إلى هذه الردة عن الكلاسـيكية ؟ من الطبيعي أن تعترض هذه التساؤلات مسـيرتنا في قراءة هذا الكتاب، الذي لم أود أن أضعـه في صـورة حقائق غير قابلة للنقـاش، ووجدت أنه من حق

القارئ الكريم أن يقف على خلفية الأسـس الفيزيائية التي بُنيت عليها فلسـفة تكنولوجيا النانو، وأن أضع بـين يديه ما ذهب إليه العلماء من اتفاق واختلاف.

المادة

تؤدي المواد دورا مهما ورئيسيا في حياتنا، حيث لا ننتهي من استخدام المـواد في كل لحظة من لحظات حياتنـا اليومية، متنقلين في ذلك من مادة إلى أخرى، ومن استخدام إلى آخر. ولعلي لا أكون مخطئا إن ظننت أن المواد هي صاحبة الدور الأكثر تأثيرا في إثراء ثقافة الإنسـان وبناء حضارته. لذا فلم يكن غريبا أن يتم تصنيف وتقييم الدول وفقا لتقدمها في إنتاج واستخدام المواد بالتطبيقات الصناعية والتكنولوجية المختلفة، وعلى الأخص المواد الفلزية لسـبائك الصلب. وعلى النقيض من البلاد النامية التي يسـتهلك الفرد الواحد فيهـا من منتجات الصلب المتنوعة أقل من 10 كيلوغرامات سـنويا، فإن نظيره في الدول المتقدمة والدول الثرية يستهلك أكثر من 750 كيلوغراما سنويا.

وأحسـب أن مؤشرات التنمية الاقتصادية والتقدم التكنولوجي في أي دولة لا ترتبط بهذا النمط الاسـتهلاكي مـن مخرجات ومنتجات المـواد، بل ترتبط في المقام الأكبر بمدى تقدم الدول في إنتاج وتصنيع تلـك المنتجات داخـل الدولة ذاتها وثقة المسـتهلك بتلـك المنتجات. وهـذا بالطبـع لا يتأتى من فراغ، بل يقوم علـى مدى مهارة حكومات الدول في وضع وحياكة خطط بحثية مُبتكرة وتفعيل سياسـات الربط بـين البحث العلمـي والقطاعات الصناعية بحيـث تتمكن الدولة من توظيف الإمكانات الإبداعية والابتكارية لأبنائها وتوجيهها نحو ابتكار تكنولوجيات حديثة وعمليات هندسـية متطورة تعمل على تميز وتفرّد منتجاتها الصناعية.

وقد قاد التفكير الإبداعي الذي وهبه الله للإنسان إلى معرفة كيف يتدخـل للهيمنة على البنية الداخلية للمادة وإعـادة صياغتها وتعديل هويـة عناصرها عـن طريق إضافة ذرات من عناصـر أخرى إليها أو

إقصاء ذرات مواد أخرى قد تكون متأصلة داخل هيكل المادة الأساسية. لذا فقد أدرك الإنســـان منذ تلك اللحظة مدى الدور المهم الذي يؤديه هذا التدخل في تحســـين صفات المـــادة وتعظيم خواصها وإيجاد آفاق تطبيقيـــة جديدة ومبتكرة. وقد قاد التطور الســـريع في علم المواد [1] Materials Science إلـــى ميـــلاد عائلات جديدة من المواد، اتســـعت وتباينت رقعة تطبيقاتها منذ اللحظة الأولى لبداية ظهور الإنسان على ســـطح الأرض، فأصبحـــت بمنزلة القاطرة التي دفعت البشـــرية نحو تحقيق ثوراتها الصناعية الكبرى التي أشـــرنا إليها ســـلفا في مقدمة هذا الكتاب.

ولقـــد كان لتلك الثورات أعظـــم الأثر في قيادتنا خلال العشـــرين ســـنة الأخيرة كي ننجح في تفجير ثورتـــين متتاليتين هما «التكنولوجيا الحيوية» ثم «تكنولوجيا المعلومـــات والاتصالات». وأخيرا، وليس بآخر أعلن الإنســـان عن تفجيره لأعظم ثورة في التاريخ البشري وهي «ثورة تكنولوجيـــا النانـــو» التي أعارت اســـمها لهذا القرن الـــذي نعيش فيه فلُقب «بقرن تكنولوجيـــا النانو». ولأن كل هذه الثورات وتلك النجاحات المتواصلة قد تفتقت عن تطبيقات المواد، فلم يكن غريبا أن تشغل المادة الحيز الأكبر من تفكير الفلاســـفة قبل أن تشـــغل عقـــل وفكر العلماء والباحثين، وذلك لكونها تمثل العالم المادي المحسوس لدينا.

وتعـــد المادة المعول الرئيســـي الأول في بناء الحضارة البشـــرية، حيث تحتل المســـاحة الأضخم لبرامج العلماء البحثيـــة والتجريبية منذ أن فكر الإنســـان في اســـتخدام الأحجار والصخور إلى أن استخدم المواد النانوية في صنع حضارة القرن الحادي والعشرين.

تبين لنا مما ســـبق سرده، مدى أهمية المادة في صنع الحضارة وفي تقدم الأمم ونهضتها. ومن أجل هذا لا بد من وصفها ومعرفة خواصها التفصيليـــة حتـــى نســـتطيع أن ننتفع مـــن مخرجاتها فـــي التطبيقات المختلفـــة. وفـــي حقيقة الأمر، فقد مر وضع تفســـير محدد وثابت عن ماهية المادة وما تحتوي عليه من جســـيمات صغيرة بسلسلة طويلة من المراحـــل الفلســـفية والفكرية والعلمية، حيث اختلـــف علماء كل مرحلة

عـن زملائهم في المراحل السـابقة والتالية لها في وضع تعريف للمادة وترسـيخ تفسيرات ثابتة ومحددة لسـلوكها وخواصها، واختلفوا أيضا فـي تعريف ما تحتوي عليه المادة من جسـيمات غير مرئية وهوية تلك الجسيمات ودورها في تحديد سمات المادة وخواصها.

كلاسيكيات نيوتن لوصف المادة

علـى الرغم من ذلك النقد التهكمـي اللاذع الذي تعرضت له نظريات نيوتن الخاصة بتعريف العالـم المادي وعلاقته بالزمان والمكان، فإن تاريخ العلم منذ أن عرف الإنسـان كيف تتحرك الأجسـام وكيف تسبح الأجرام السـماوية في هذا الفضاء الشاسع، وإلى يومنا هذا ما زال يحتفظ بذكر «إسـحق نيوتن»، ذلك الإنسـان المُبدع مؤسـس علم الفيزياء الكلاسيكية، حيث يُعد العالم الفيزيائي والرياضي الأكثر شهرة والأعظم اعتبارا ومكانة على الإطلاق؛ فقد اخترع نيوتن التلسـكوب العادي وراقب حركة الأجرام السـماوية والكواكب ووضع قوانين لحركتها ودورانها، وفسـر لنا ظاهرتي المد والجزر، وهو مؤسـس علم التفاضل والتكامل وعلم الميكانيكا، والذي بفضله عرفنا قانون الجاذبية.

ووفقا لكلاسـيكيات الفيزياء التي أسسـها نيوتن، فإن الكون المادي يقـوم على كلمـات ثلاث هي: المـادة والمكان والزمان. وقـد رأى نيوتن المـادة على أنها أجسـام كبيرة صلبة ومتماسـكة تُوجد على هيئة صور من الأشـكال والأحجام المختلفة. كما اعتقد - أي نيوتن - أن الذرة هي أصغـر جزء في هذا الكون المادي الذي يمكن أن تنقسـم إليه أي مادة. وهـذا يعني غياب محتويات الذرة من الجسـيمات المتناهية في الصغر مثل البروتونات والنيترونات والإلكترونات من هذا التعريف الذي وضعه نيوتن في أواخر القرن السادس عشر.

وقد أضفى نيوتن علـى نظريته الخاصة بتعريف المادة صبغة دينية جانحة إلـى المبادئ الفلسـفية التي رسـخها تلميذ أفلاطـون ومُعلم الإسـكندر الأكبر وغيره مـن القياصرة والملوك الفيلسـوف الإغريقي الشـهير «أرسـطو» ومفاهيمه المتعلقة بالكون والعلوم الفيزيائية، حيث

شـــكلت تلك المبادئ - على الرغم من قدمها الذي يرجع إلى عام 360 قبل الميلاد - حجر الزاوية في نشـــأة مبادئ ومفاهيم الفيزياء القديمة، التي رُوج لها أو بعبارة أخرى استمالت ترحيب وارتياح الكنيسة المسيحية خلال العصور الوســطى وعصر النهضة في أوروبا. لذا فقد آمن نيوتن بعدم فناء المادة وأزليتها في الوجود، وثبات كتلتها وطاقتها من دون أدنى تغيير، وقد أدى هذا الفرض إلى إيمان راسخ وعميق بأزلية الكون المادي واستحالة فنائه واندثاره.

وفي إطار هذا المنطق، شيدت فلسفة نيوتن «المادية» أعمدة المدرسة الكلاســيكية الحديثة للفيزياء ورَسَّخت صرحها على عدة مفاهيم ثابتة اعتنقتها طائفة أهل العلم ورجالاته طوال قرنين من الزمن وحتى بداية القرن العشرين. وكان أهم ركن بها هو عدم الربط بين حقيقة المادة من جهة والزمــان أو المكان الموجودة به، وذلك اســتنادا إلى المبدأ الصارم المؤمن بأزليـــة المادة، وبأنها لا تَفنى ولا تندثــر. وإن جازت لي صياغة مبادئ تلك المدرسة العلمية والفلسفية، فنستطيع أن نوجزها في النقاط الثلاث التالية:

- قيام الكون على أســاس المادة المُمثلة في جســيمات -الذرة - ذات كتلة وطاقة.
- تتمثــل طاقة أي مادة في الضوء، الإشــعاع الحــراري، وكذلك في الموجات الكهرومغناطيسية الصادرة عن المادة.
- لا مجال لمناقشة الظواهر الطبيعية في الكون، حيث إنها بعيدة كل البعد عن مجال تدخل الباحث الذي عليه أن يلزم الصمت أمامها، وذلــك باعتبارها ظواهر مؤكدة تتمتع بالاســتمرارية والتكــرار ولاتحتــاج إلــى أي اجتهــادات علميــة لتأويلها أو تفسيرها، لأن كل هذا يمثل مضيعة لوقت وجهد الباحث فيما لا عائد منه ولافائدة.

كانت هذه هي فلســفة المبــادئ التي حكمت نظريات نيوتن وأســرتها داخــل قضبان فولاذية لا تقبل أي تعديــل أو تأويل. وعلى الرغم من ذلك كلــه، فقد حققت تلك المبادئ والأطر حينذاك نجاحات كبيرة ومتعددة في

مختلف المجــالات العلمية، خاصة بعد نجاح الجهود العلمية الخارقة التي قــام بها عشــرات العلماء الأفذاذ مثل فــارادي Faraday وكلفن Kelvin، هيرشــل Herschel، الذين اســتوحوا إلهاماتهم الإبداعيــة في مجالات الكيميــاء والفيزيــاء والفلك من عقل ومنطق نيوتــن وفرضياته، محققين فــي ذلك إنجازات هائلة تمثلت في تفســير حركة الأجســام، وميكانيكية التفاعــلات الكيميائيــة الحادثة بين ذرات المواد المختلفــة، وكيفية انتقال الحــرارة والكهربــاء والضوء من جســم إلى آخر، وإلى مــا غير ذلك من اكتشــافات فيزيائيــة مهمة اهتمت بها الأوســاط العلميــة خلال القرون الثلاثة السابقة للقرن العشرين (2، 3).

أفول نجم الفيزياء الكلاسيكية

توفي نيوتن في عام 1727 وهو على ثقة ويقين بأن قوانينه ونظرياته الخاصة بالمادة ســوف تُكتب لها الاســتمرارية والخلود، شأنها في ذلك شــأن المادة التي آمــن بخلودها وببقاء طاقتها وكتلتها بلا تغير. وســاد اقتنــاع العلماء بقوانــين نيوتن الخاصة بالذرة، وبعلاقــة المادة بالزمان والمكان طــوال ما يربو على قرنين من الزمان، الأمر الذي بســببه زعم علمــاء الفيزياء والرياضيات في القرن التاســع عشــر أن تلك القوانين سوف تهيمن على كل الظواهر الطبيعية والفيزيائية التي قد يتم التوصل إليها خلال القرن العشرين.

وقد كان من بشائر حدوث ثورة القرن العشرين المتمثلة في تأسيس علم الفيزيــاء الحديثة وأفول نجم فرضيات نيوتن الكلاســيكية، ما أثبته العالم الشــهير طومسون Thomson (4) في عام 1856 من أنه إذا ما تم شُحن جسم ما بشحنة كهربية، فإن كتلته لا تكون ثابتة حيث إنها تتغير في أثناء تحرك الجســم؛ فقد لاحظ طومسون تزايد كتلة الجســم المشحون بالكهرباء مع زيادة سرعة حركته. ومنذ ذلك الحين أصبحت فرضية نيوتن الخاصة بحتمية بقاء كتلة الجســم بلا تغيير - مبــدأ نيوتن في بقاء الكتلــة - أصبحت مجرد ذكرى تتناقلها كتب التاريخ العلمي.

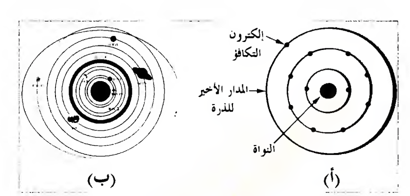
وقد استمر طومسون في تجاربه العلمية المثيرة إلى أن فجّر في أواخر القرن الثامن عشر مفاجأة كبيرة من العيار الثقيل، حيث برهن على خطأ الاعتقاد الســائد بأن الذرة هي أصغر جســيم يمكن أن تنقسم إليه المادة، فقد بدد طومســون بتجاربه الرائدة ذاك المفهوم السائد وأثبت بالتجارب العملية وبتقديم الأدلة والبراهين أن الذرة تتألف من مجموعة جســيمات متناهية الصغر والوزن مثل الإلكترونات Electrons، البروتونات Protons والنيوترونات Neutrons.

وقد اســتمر أحد تلاميذ طومسون وهو رذرفوردRutherford [4] في دراســة الذرة وخواصها إلــى أن انتهى إلى وضــع النموذج الذري الحديث. فكمــا يعلم القارئ الكريم فإن الذرة تتكــون من نواة مركزية Central Nucleus كبيرة الحجم، شــديدة الكثافة - وذاك بالمقارنة مع بقية مكونات الذرة، حيث تحتوي على جســيمات الشحنة الموجبة وهي البروتونات، هذا بالإضافة إلى احتوائها على جسيمات عديمة الشحنات وهي النيوترونات. وتحاط النواة بعدة مدارات Orbits تحتلها جسيمات صغيرة الأحجام، خفيفة الأوزان تُسمى الإلكترونات وهي تحمل شحنات ســالبة [*]، كما هــو موضح في الشــكل (2 - 1 «أ»). ونســتطيع من الشــكل ملاحظة أن الذرة تحاكي في بنائها نظام المجموعة الشمســية (الشــكل 2 - 1 «ب») حيث ترتبط الإلكترونات في الذرة بجســم النواة المركزي الأكبر حجما والأثقل كثافة عن طريق قوة جذب كهربائية ساكنة Electrostatic Attraction Force تعمل على جذب هذه الإلكترونات كي تدور في فلك النواة [5].

وتدفــق بعد ذلك إلــى يمّ الفيزياء الحديثة كــم هائل من نتائج ومخرجــات الأبحــاث العلميــة والنظريات الخاصة بالــذرة والتي أصبحــت بعد ذلك بحارا ثم محيطات تبلورت بها فلســفة وأهمية وجود الإلكترونات في مدار الذرة الأخير، والمعروفة باسم إلكترونات التكافــؤ Valence Electrons والمســؤولية الملقــاة على عاتقها في تمثيل الذرة والتعبير عن خواصها الكيميائية للمادة. ويتحدد سلوك

(*) انظر الهامش الرقم (2).

العنصـــر عند دخوله فـــي التفاعلات الكيميائية مـــن قيمة تكافئه Valence والـــذي به يتحدد العدد الكلي لإلكتروناته الســـابحة في مداره الـــذري الأخير، كأن نقول مثلا إن تكافؤ الصوديوم هو واحد صحيح، وذلك لوجود عدد إلكترون واحد في مداره الأخير، كما هو موضح بالشكل (2-2 «أ»).



الشكل (2 - 1) : تحاكي الذرة في بنيتها (الشكل «أ»)، المؤلفة من نواة مركزية موجبة الشحنة محاطة بعدة مدارات تدور فيها الإلكترونات ذات الشحنات السالبة، نظام المجموعة الشمسية (الشكل «ب») الذي تتوسطه الشمس حيث تدور حولها مجموعة من الكواكب تتفاوت في أحجامها وكثافتها وبُعدها عن النجم الشمسي. والنموذج المبين في الشكل «أ» يوضح البنية الذرية لعنصر الصوديوم. حيث تتوزع إلكترونات ذرته في عدة مدارات، ويُطلق على إلكترون المدار الأخير اسم «إلكترون التكافؤ» الذي يتحمل مسؤولية الإقدام للمشاركة في التفاعلات، والذي به يتحدد النشاط الكيميائي لأي عنصر. ويتم تحديد تكافؤ العنصر وفقا لعدد الإلكترونات الموجودة في المدار الأخير للذرة - مدار التكافؤ - فيقال إن العنصر أحادي التكافؤ، كما هو في ذرة الصوديوم وذلك لأن مدار ذرته الأخير به عدد إلكترون واحد. وكلما قل عدد إلكترونات مدار ذرة العنصر الأخيرة، زاد نشاط العنصر وتعاظمت قدرته على الدخول بشراهة في التفاعلات الكيميائية (6).

ثورة الفيزياء الحديثة

على الرغم من اقتناع علمـــاء الفيزياء والفلك في تلك الفترة التي ســـبقت القرن العشرين بأن العالم وكل ما يحتويه من ظواهر فيزيائية قد أضحى مفهوما ومُبررا، إلا أنهم وقفوا متحيرين إزاء بعض الظواهر

الفيزيائية التي لم تفلح قوانين نيوتن في وضع تفسيرات مقنعة لها، ومن أشهر تلك المعضلات الفيزيائية التي جاء تفسيرها متناقضا مع كلاسيكيات نيوتن الفيزيائية، هذا التناقض الكبير بين مبادئ النظرية الكهرومغناطيسية وظاهرة التأثير الكهروضوئية (الظاهرة الفوتوكهربائية) وإشعاع الجسم الأسود. فقد عجز العلماء عن إيجاد تفسير مريح ومنطقي لكيفية توزيع الطاقة الخاصة بالأجسام الصلبة الساخنة على الأطوال الموجية للضوء؛ حيث اكتشفوا أن الطاقة الحركية التي تكتسبها الإلكترونات المنبعثة المُثارة من الجسم نتيجة للتسخين لا تتناسب تناسُبا طرديا مع شدة الضوء، ولكنها تتناسب مع تردد الموجات الضوئية، وذلك بخلاف ما ذهب إليه نيوتن من أن شدة الإشعاع تزداد بتناقص الطول الموجي للموجات الضوئية، أي أنها تتناسب تناسبا عكسيا معها.

وقد برزت هذه الأزمة لتُغير من نظرة العلماء إلى مُسلمات نظرية نيوتن، لتكون بمنزلة الشرارة الأولى لإعلان ثورة علمية جديدة. وعلى المستوى الشخصي فإنني أري أن ما ذهب إليه كثيرون في وصف هذه الثورة بأنها أطاحت بقوانين نيوتن الكلاسيكية وفرضياته أو وجّهت إليها لطمة قاسية، فيه كثير من التجني على جهود نيوتن ونصاعة أياديه على العلوم الفيزيائية والرياضيات، حتى إن لم يحالفه التوفيق في بعض أو كثير من تلك الفرضيات النظرية؛ لذا فقد يتفق معي القارئ الكريم على أن نجنح معا ونصف تلك الثورة بأنها جاءت لتصحيح نظريات وافتراضات نيوتن الكلاسيكية في القرنين السابع عشر والثامن عشر، وذلك من خلال التجربة والتحليل وبتوظيف إمكانيات معملية وبحثية أكثر تطورا مما كانت عليه وقت أن أبدع نيوتن تلك الافتراضات. ولعل وصف العالم الشهير ألبرت آينشتاين لما قام به نيوتن من جهود علمية خارقة حين قال «إن المفاهيم التي طورها نيوتن مازالت تقود تفكيرنا في الفيزياء حتى اليوم» قد يوفيه بعض حقه من الاحترام والتقدير.

ميكانيكا الكم، هل هي إعلان مبكر عن بزوغ تكنولوجيا النانو؟

لم يشــأ «ماكس بلانك» Max Planck [7] أن يطوي القرن التاسع عشــر صفحته مــن دون أن ينتهي من تجاربــه الفيزيائية الفريدة التي عرض نتائجها خلال جلســة من جلســات اجتماع الجمعية الفيزيائية التابعــة لأكاديمية العلوم في برلين، المُنعقدة في ديســمبر 1900. وفي خلال هذه الجلســة التاريخية، أعلن بلانك نجاحه في تفســير طبيعة إشــعاع الموجات الكهرومغناطيســية للمادة، وذلك من خلال اعتبار أن الإشعاعات الصادرة من جسم المادة ليست مجرد موجات ولكنها تتألف من جسيمات أُطلق عليها اسم الفوتونات Photons، حيث برهن على أن شدة الإشعاع تتناسب تناســبا طرديا مع عدد الفوتونات الصادرة، وأن طاقة الفوتــون تعتمد على تردده. كذلك أظهرت نتائجه أن طاقة الذرة ليست متصلة، بل يمكن تقسيمها إلى عدة مستويات للطاقة توجد فيها جسيمات متناهية الصغر وهي الإلكترونات. وقد دعمت نظرية النسبية لآينشــتاين في عام 1905 نتائج بلانك والتي صححت رُكنا أساسيا من أركان افتراضــات نيوتن المتمثلة في العلاقة الرابطة بين الزمان والمكان والمادة، فقد أثبت آينشتاين أنها علاقات ليست مُطلقة أو ثابتة، بل هي نسبية ومتغيرة [8].

وقد مثلت نتائج تجارب ماكس بلانك ومن بعده آينشــتاين إشــعارا لميلاد ثورة ميكانيــكا الكــم Quantum Mechanics وفتحا علميا آدى إلى تصحيــح نظريات الفيزياء الكلاســيكية، مما ســاعد على دخول الفيزياء إلى مجالات جديدة ومتعــددة كان من أبرزها مجال العمليات الحرارية التي تعد أصل علم الديناميكا الحرارية وتأســيس قواعد علم الديناميكا الكهربية. وأود الإشــارة إلى أن كلمة «الكم Quantum» هي كلمة لاتينية الأصل معناها «كمية»، وترجع تســمية النظرية بهذا الاسم إلى أن الطاقة التي تكتســبها الأجســام أو تمنحها لجســم أو أجسام أخرى لا تنتقل بصورة مســتمرة ومتواصلة، ولكنها تنتقل متقطعة على هيئــة كميات - جمــع كلمة «كم» - أو دُفعات متتاليــة، لذا عُرفت هذه النظرية بميكانيكا الكم. وأحســب أن المرجع التاسع المُدون في هوامش

هذا الفصل من الكتاب سـوف يكون عونـا للقارئ المهتم بمعرفة المزيد من التفاصيل عن ثورة ميكانيكا الكم ونظرية النسـبية، وذلك نظرا إلى بساطة عرضه وعمقه ودقة معلوماته.

وخلال الخمسـين سـنة الأولى من القرن العشـرين، توالت فتوحات الفيزياء الحديثة وغزواتهـا الميدانية إلى جميع أفرع العلوم والتكنولوجيا، حيث تأسسـت النظريـات المنطقية الحديثة القائمة علـى ثورة ميكانيكا الكم، فلم يكن من المسـتغرب أن يتحقق خلال تلـك الفترة الخصبة إنتاج أكثـر من 75% من أسـس ومبادئ علـم الفيزياء المعروف لنـا اليوم [9]، وكان لهمة الباحثين القابعين بمعاملهم ونشـاطهم العلمي والبحثي الملتهب خلال الخمسـين سـنة المتبقية من القرن الماضي أبلـغ الأثر في تضاعف عدد الأبحـاث وتعدد النظريات الرائدة التي مهدت الطريق لانطلاق ثورة تكنولوجيا النانو.



3

الذرة والجزيء: بُناة صرح النانو وفرسانها

«لا يعتني علماء تكنولوجيا النانو كثيرا بمثالية شكل وحجم بلورات المادة بقدر اهتمامهم بتحسين ومضاعفة خواص المادة»

المؤلف

كما ذكرنا في الفصل السابق من الكتاب، فإن الذرة هي العنصر الرئيسي المُكون لأي مادة، والتي على أساسها تتحدد سمات المادة وخواصها وترسم سياسات وطبيعة علاقاتها وتفاعلاتها مع ذرات المواد الأخرى لبناء جسيمات المُركبات الكيميائية التي تُعرف بالجزيئات Molecules. وتُعد ذرات وجزيئات المواد، التي تنخفض مقاييس أحجامها إلى مستوى النانومتر، بمنزلة أحجار الزوايا المستخدمة في تشييد صرح تكنولوجيا النانو.

ومثلما يهيمن العازف الماهر على الخطوط الأساسية للحن والتلاعب Manipulation بأوتار قيثارته لإخراج أروع الجمل الموسيقية، فإن تكنولوجيا النانو قد هيمنت على خواص المادة

وسلوكها، وذلك من خلال قدرتها على إعادة تنظيم وترتيب ذرات المادة Atomic Arrangement والتلاعب بجزيئاتها، مع التحكم في بنية هياكلها الداخلية عن طريق تصغير مقاييس أبعاد حبيباتها Grain Sizes المكونة لتلك الهياكل. ومن ثم فقد أضحت المادة الواحدة، بعد سيناريو التغيير التراجيدي هذا، تبدو وكأنها مادة مختلفة تتمتع بخواص وصفات متميزة.

وفي هذا الصدد قدمت تكنولوجيا النانو الكثير من التقنيات المُبتكرة والسُبل المُيسرة التي تمكننا من التحكم في البناء الذري Atomic Structure الداخلي للمادة، وتطوير نمط ترتيب الذرات بمواقع الشبكات البلورية Crystal Lattices، مما أدى إلى طفرة هائلة في منهاجية علوم المواد أدت إلى ميلاد أنواع جديدة من المواد غير النمطية التي تختلف في خواصها عن أترابها من المواد التقليدية. ويرتبط النجاح في تفهم علم النانو وتكنولوجيتها بمدى إدراكنا وتفهمنا لبنية المادة وترتيب ذراتها الداخلية، لذا فقد يتفق معي القارئ الكريم في أن نستعرض معا في هذا الفصل من الكتاب مدى ارتباط خواص المادة ببنيتها الداخلية والترتيب الذري بها.

الجزيئات والروابط الكيميائية

نادرا ما توجد ذرات المادة في صورة فردية أو عنصرية منعزلة، وإنما تجنح إلى أن تتحد مع غيرها من ذرات العناصر الأخرى، مكونة بذلك مركبات كيميائية تتألف من جزيئات. وخلال تطوير النظرية الذرية برز سؤال مهم عن سبب تولد هذه النزعة عند الذرات الأحادية، وكانت الإجابة التي اجتهد العلماء طويلا في أن يصلوا إليها هي أن قيم الطاقة الخاصة بالمركبات المتكونة تكون أقل في القيمة، مقارنة بتلك القيم الخاصة بالذرات الفردية. وهذا يعني أن ذرات العناصر تتجه دائما إلى تحقيق الاستقرار وتخفيض طاقاتها، وذلك من خلال لجوئها إلى أن تتفاعل كيميائيا مع ذرات عناصر أخرى لتكوِّن جزيئات مادة المركبات التي تكون أكثر استقرارا، وذلك يرجع إلى انخفاض قيم الطاقة لها.

ويتكون الجزيء من ذرات عنصر أو أكثر، ومن خلال روابط تُعرف باسم الروابط الكيميائية Chemical Bonding والتي تؤدي إلكترونات المدارات الأخيرة للعناصر الدور الرئيسي الأكبر في تكوينها. ولعل الرابطة الناشئة بـين أيون الصوديـوم الموجب وأيون الكلور السـالب لتكوين جزيء كلوريد الصوديـوم - ملح الطعام - المتعادل أحد أشـهر الأمثلـة لذلك النوع من الروابط الكيميائية المعروفة باسم الرابطة الأيونية Ionic Bonding. ونودّ أن نشير هنا إلى أن الروابط الكيميائية تعد مفتاحا من مفاتيح تكنولوجيا النانـو، وذلـك لأن تلك الروابط تجمـع بين أيونات العناصـر الكيميائية مولـدة بذلك صـورا أخرى من المواد على هيئة جزيئـات متناهية الصغر والتي تمثل أحجار البناء الأساسـية في الصناعات الجزيئية Molecular Manufacturing الخاصة بتكنولوجيا النانو.

البلورات

بالإضافـة إلى تأثير البنية الذرية للمادة في تحديد نشـاطها وخواصها الفيزيائية والكيميائية، فإن تنظيم وجود ذرات المادة داخل هياكل بلورية تشبه تلك البنايات السـكنية التي نعيش فيها، يؤدي دورا رئيسيا ومهما في تحديد خواص المـادة. وأود في هذا الجزء من الفصـل الثالث أن أصطحب القارئ لنسـتعرض معا كيف تنسـق ذرات المواد الصلبة مواضعهـا في تلك البنايات البلورية، وتأثير هذا الترتيب على سلوك المادة وخواصها، وسوف نوجز أيضا في تحليل وتبرير ارتباط الخـواص المختلفة للمادة بمقاييس أبعاد حبيباتها. وقد يرغب القارئ الكريم في التزود بتفاصيل أكثر عن البناء البلوري Crystal Structure فـي المواد الصلبـة وذلك من خلال الاطلاع على نخبة متميزة من مراجع مُختارة، يُسعدني أن أضع أسماءها تحت تصرفه [1، 2، 3].

الشبكات البلورية

تجنح الذرات الأحادية Single Atoms للمواد البلورية Crystalline Materials الصلبـة لأن تقيم علاقات قوية ووثيقة مع شـقيقاتها من الذرات المكونة للمادة نفسها وكذلك مع أترابها من ذرات المواد الأخرى.

وتتأتـــى هذه العلاقـــات الحميمية نتيجة لما تُبديـــه ذرات المواد الصلبة من نزعة للقيام بترتيب أنفســـها في نظام نموذجي منتظم يُعرف باسم النظـــام البلوري، والذي تصطف فيه الـــذرات في مواضع فراغية ثابتة تُســـمى نقاط الشـــبكة البلورية Lattice Points. ويكـــون ذلك الترتيب الذري علـــى هيئة بلورات أحادية من المادة Single Crystals تتبلور في أشـــكال هندســـية منتظمة تنتمي إلى إحدى الفصائل البلورية Crystal Group السبع المعروفة لدينا [4]، والتي من بينها فصيلة المكعب.

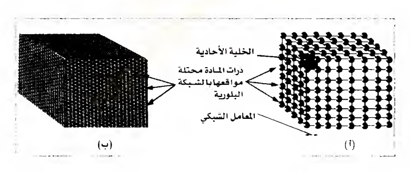
ونســـتطيع تعريف الشبكة البلورية بأنها الهيكل Skeleton الذي تقوم فيـــه مجموعة من ذرات المادة باحتلال مواقعها داخله وترتيب أنفســـها به وذلك بشـــكل منتظم ومتكرر [5]، ونادرا مـــا توجد المواد على هيئة بلورات أحاديـــة، لكنها توجد عادة فـــي صورة بلورات متعـــددة Polycrystalline تتألف من تجمع عدة بلورات أحادية.

ويوضح الشكل (3 – 1 «أ») رسما تخطيطيا للشبكة البلورية الخاصة لأحد العناصر التابعة لفصيلة المكعب البسيط والتي فيها ينتظم ترتيب الذرات على نقاط الشبكة، مكونة بذلك شكلا هندسيا منتظما تتساوى أبعاد جميع أضلاعه. وإذا ما نظرنا إلى الشكل المذكور، فسوف نلاحظ أن الهيـــكل الكلـــي للمكعب يتألف من عدة مكعبـــات أصغر، يُطلق على الواحـــد منها اســـم الخلية الأحاديـــة Unit Cell والتـــي تتجمع بها كل صفات وســـمات وخواص المـــادة، ومن ثم فهي بمنزلـــة جينات الخلايا الحية التي تحدد الصفات الوراثية المتعلقة بســـمات الكائن الحي. وكما تختلف البصمة الوراثية من إنســـان لآخر، فـــإن مقاييس أبعاد الخلية الأولى للمادة تختلف من مادة واحدة إلى أخرى، بحيث لا توجد مادتان متطابقتان بتلك الصفة على الرغم من وجود هذا الكم الهائل من المواد الطبيعيـــة والصناعية [6]. ونســـتطيع التعبير عن مختلف خواص المادة وذلك من خلال تحديد قيمة مقياس أبعاد خليتها الأحادية، حيث يُطلق على هذا البُعد مصطلح مُعامل الشـــبكة البلورية Lattice Parameter. ومن الجدير بالذكر أن المواد الموجودة على شكل هندسي واحد كالمكعب مثلا، وعلى الرغم من اختلاف قيم معاملات شـــبكاتها، فإنها تتشـــابه

في الصفات والخــواص الكيميائية والفيزيائية. هــذا وينطبق المفهوم نفســه أيضا على المجموعات الأخرى من الشبكات البلورية التي تترتب فيها الذرات على هيئة أشكال هندسية أخرى منها متوازي المستطيلات والمسدس والمعيّن.

ويوضح الشــكل (3 - 1 «ب») صورة مجســمة مأخوذة بواسطة مؤلف هذا الكتاب

لعينة في أثناء فحصها تحت الميكروســكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقــة HRTEM والتي تظهر بها الذرات المكونــة للمادة المُختبرة على هيئــة نقاط منتظمة الترتيب حيث تتســق على هيئة أعمدة أو صفوف متوازية [7]. وإذا ما نظرنا إلى هذا الشكل، فسوف نلاحظ مدى براعة الذرات في تنظيم أنفسها على هيئة صفوف وأعمدة تتساوى المسافات البينيــة الفاصلة بينها، وتغيب عن ملامحها العشــوائية الفوضوية في الترتيب والتنظيم، كما نلاحظ من الشــكل عدم حيدان أي ذرة عن هذا الترتيب الذري المُحكم.



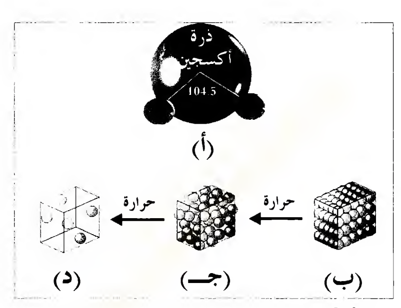
الشكل (3 - 1): يعرض الشكل (أ) رسما تخطيطيا مجسما محاكيا للشكل الحقيقي المبين في (ب) والذي يعرض الشبكة البلورية لإحدى السبائك الفلزية وعلاقة الذرات بعضها ببعض من حيث الترتيب والمسافات البينية الفاصلة بينها في هيكل الشبكة. ومن الشكل تتضح للقارئ الكريم نزعة ذرات العنصر إلى احتلال مواقعها في هيكل الشبكة، وذلك في نقاط منتظمة ومتكررة على طول أعمدة وصفوف المستويات الذرية الأفقية والعمودية المكونة لهيكل الشبكة. ومبين في الشكل (أ) المعامل الشبكي وكذلك الخلية الأولى اللذان يعبران عن صفات وخواص المادة المتبلورة تعبيرا كاملا [8].

غياب المثالية عن الترتيب الذري

على النقيض من ذلك النظام الذري المنتظم السائد في المواد الصلبة والذي ناقشناه في الجزء السابق، والذي تنتظم فيه ذرات المادة على المدى الطويل Long-range Order لتكون الهياكل البلورية للمواد، فإن جزيئات جميع السوائل بلا استثناء، وكذلك ذرات بعض المواد الصلبة، تحيد عن هذا النظام مبدية رغبتها في إبرام علاقات خاصة فيما بينها أو مع غيرها من الذرات، لتكون منهاجا آخر للترتيب الذري يُطلق عليه اسم التنظيم الذري قصير المدى Short-range Order. ويرجع سبب تسميته بهذا الاسم إلى وجود علاقة منتظمة تربط بين الذرات المُكونة لجزيئات سائل ما. فعلى سبيل المثال يتألف جزيء الماء من ذرتين من غاز الهيدروجين ترتبطان بزاوية ثابتة قيمتها 104.5 درجة مع ذرة من غاز الأكسجين، كما هو مبين في الشكل (3 – 2 «أ»). وقيمة تلك العلاقة الزاوية التي تأسس عليها ارتباط ذرات الهيدروجين مع الأكسجين تكون ثابتة ولا تتغير من جزيء ماء إلى آخر. هذا بينما لا تُبدي جزيئات الماء أي استعداد لتنظيم علاقاتها مع الجزيئات نفسها المتاخمة لها على هذا النحو من الانتظام، لذا فهي تحتل الفراغ المتاح لها أن تشغله في عشوائية، أو لنا أن نصفه بالفوضى. ويعرف النوع الثالث والأخير من الترتيب الذري للمواد باسم النظام العشوائي غير المنتظم No-order حيث تحتل ذرات المادة الفراغ الذي تشغله في عشوائية ومن دون أدنى ترتيب. وتخضع ذرات جميع الغازات مثل الأكسيجين، الهليوم، الأرغون والنيتروجين وغيرها لهذا النظام.

ويوضح الشكل (3 – 2) رسما تخطيطيا عاما لأنماط الترتيب الذري في الحالات الثلاث من المادة وهي الصلبة والسائلة والغازية، وتأثير الحرارة في تحول كل منها إلى الأخرى. ولنأخذ الماء مثالا تطبيقيا، فالماء في حالته الثلجية الصلبة، يكون على هيئة بلورات تتألف من جزيئات منتظمة الترتيب (3 – 2 «ب»)، بيد أنه إذا ما تم تعريضه لدرجات حرارة أعلى من الصفر المئوي فإنه يتحول إلى الحالة السائلة والتي فيها تبدأ جزيئاته في التحرر من روابطها المنتظمة الموجودة عليها في الحالة الصلبة، مكونة

بذلــك نمطا آخر من الترتيب الذري الذي تفقــد فيه جزيئات الماء مثالية الانتظام في الترتيب (3 - 2 «جـ»). ومع استمرار الحث الحراري فإن الماء السائل يتحول إلى الحالة الثالثة من المادة، وهي الحالة الغازية، والتي بها تســود العشوائية حيث تعم الفوضى في ترتيب جزيئات بخار الماء، كما هو مبين في الشكل (3 - 2 «د»).

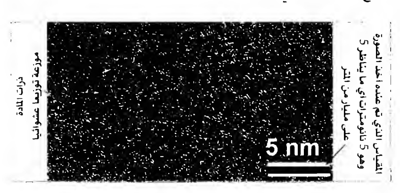


الشكل (3 - 2): يعرض الشكل (أ) رسما تخطيطيا يوضح تركيب جزيء ذرة الماء المؤلف مــن ذرة مــن ذرات الأكســجين المرتبطة مع ذرتين مــن ذرات الهيدروجين بزاوية مقدارها 104.5 درجة. يظهر بالشكل مدى تأثير درجة الحرارة على ترتيب ذرات جزيئات الماء في الحالات الصلبة (ب) والسائلة (جـ) والغازية (د) (8).

وأود ألا تفوتنــي فرصة الإشــارة إلــى أن هذا التفــاوت الكبير في الانتظام الذري لحالات المادة الثلاث يســفر عن تولد اختلافات شاسعة فــي صفات وخواص المادة بكل حالة، فعشــوائية توزيع ذرات المادة ينجم عنها اكتســاب المادة صفات جديدة ومتميزة تفوق تلك الصفات الموجودة بها عند انتظام الترتيب الذري. وهناك العديد من الأمثلة لســبائك المواد

الأمورفية Amorphous Alloys [9] الفلزية التي يتم تحضيرها عن طريق تعمــد الإخلال بالترتيب الذري لهـــا، وذلك بهدف الحصول على خواص فيزيائية وميكانيكية متميزة وفريدة.

ويبين الشــكل (3 - 3) صورة مجهرية أخذت بواســطة الميكروســكوب النافــذ الإلكتروني عالي الدقة لعينة فلزية من عينات المواد الأمورفية. وإذا ما عقدنا مقارنة بين هذه الصورة وتلك المبينة في الشكل (3 - 1 «ب») يتبين لنا مدى العشــوائية التي تجنح إليها ذرات المــواد الأمورفية في احتلالها لفراغ الهيكل الداخلي من المادة.



الشكل (3 - 3): صورة مجهرية بالميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة لعينة مادة أمورفية من سبيكة فلزية يظهر فيها النمط الذي تنتهجه ذرات هذه المادة في احتلالها للفراغ الداخلي من شبكة المادة، وذلك بصورة عشوائية [10].

الحُبيبات

ذكرنا ســلفا أن ذرات المواد الصلبة تنظــم ترتيبها لتحتل مواقع نقاط الشــبكة البلوريــة، مكونة في هذا بلورات أحادية ذات أشــكال هندســية محــددة. وتلك البلورات الأحادية تتجمــع بعضها مع بعض بانتظام مكونة بنــاء بلوريــا أكبر، كما هو موضح في الشــكل (3 - 1) الذي يُمَثل الحالة المُثلى من الترتيب الذري في الشــبكة البلورية للمادة. وتجدر الإشارة هنا إلــى أنه ليس بالضرورة أن يؤدي الانحراف عن المثالية في الترتيب الذري للبلــورات إلى فقدان المادة خواصهــا، بل العكس هو الصحيح والغالب في

معظم الأحيان، وكما أشرنا سلفا فإن تقنيات تكنولوجيا النانو تعمد إلى خلق العديد من العيوب داخل بلورات المادة من أجل الحصول على مواد مختلفة الصفات لتميزها عن نظيرتها من المواد التقليدية.

وإذا ما فحصنا السطح المصقول لأي مادة صلبة بواسطة الميكروسكوب الضوئي بتكبير بسيط فسوف تظهر لنا حبيبات Grains متجاورة تفصل بينها خطوط متعرجة تعرف باسم حدود الحبيبة Grain Boundary، كما هو مبين في الشكل (3 - 4 «أ»). وإذا ما فحصنا العينة نفسها تحت الميكروسكوب الإلكتروني عالي التكبير والدقة فسوف نتبين تفاصيل التركيب الداخلي للحبيبات لنكتشف أنه يتألف من تجمع من الذرات يخضع لترتيب معين وثابت الشكل (3 - 4 «ب»). وتختلف أبعاد حبيبات المواد التقليدية كبيرة الحبيبات فتتفاوت في مقاييسها من بضعة ميكرومترات إلى عشرات أو مئات من الميكرومترات. هذا بالإضافة إلى أن اتجاهات الترتيب الذري بكل حبيبة تختلف عن الحبيبة المجاورة، مما يعني وجود اختلاف ملموس في صفاتها وخواصها يتفاوت من حبيبة إلى أخرى.



الشكل (3 - 4): (أ) صورة مجهرية أخذت بالميكروسكوب الضوئي لعينة من سبيكة فلزية [13] توضح تفاصيل تركيب البنية الداخلية للعينة المؤلفة من عدة حبيبات تفصل بينها خطوط يُطلق عليها اسم حدود الحبيبات. ويوضح الشكل (ب) رسما تخطيطيا يبين تفاصيل التركيب الداخلي للحبيبات واتجاه ترتيب الذرات بكل حبيبة على حدة [11].

تأثير تصغير مقاييس الحبيبات على خواص المادة

يعتبر تصغير حجم الحبيبات البلورية المكونة للمادة والتلاعب في مقاييسها وأشكالها من أهم العيوب التي تتخلف عن توظيف تقنيات تكنولوجيا النانو في تصميم المواد وتصنيعها، وذلك بالطبع من وجهة نظر

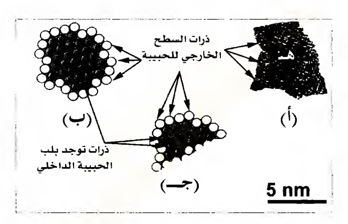
علمـــاء البلورات الذين يحكمون على جـــودة البلورة وفقا لمدى تطابقها مع النظام البلـــوري النموذجي الذي من المفترض أن توجـــد عليه. أما علماء تكنولوجيـــا النانو، فقد لايعتنون كثيرا بمثالية شـــكل وحجم بلورات المادة بقدر اهتمامهم بتحســـين ومضاعفة خـــواص المادة، وهذا يتأتى من خلال تصغير مقاييس أبعاد الحبيبات البلورية لها إلى أقل من 100 نانومتر.



الشكل (3 – 5): صورة مجهرية أخذت بواسطة المجهر النافذ الإلكتروني عالي الدقة توضح التركيب الداخلي لعينة إحدى السبائك الفلزية المخلقة [11] من قبل مؤلف هذا الكتاب. حيث تتألف من حبيبات نانونية الأبعاد (أ إلى ز) تفصل بينها خطوط وهمية تعرف باسم حدود الحبيبة. ويلاحظ من الشكل، كثافة وجود ذرات المادة داخل اللب الداخلي للحبيبات، بينما يقل وجودها على طول الحدود الفاصلة بينها.

ويبين الشـــكل (3 – 5) صورة مجهرية أُخذت بواســـطة الميكروسكوب النافـــذ الإلكتروني لعينة فلزية توضح التركيـــب الداخلي للمادة ومتاخمة حبيباتهـــا بعضهـــا لبعض، تلك المشـــار إليها في الشـــكل برموز الحروف الأبجدية (أ – ز). ومن الملاحظ أن العينة تتألف من حبيبات نانوية صغيرة

تتراوح أبعادها من 7 نانومترات إلى نحو 30 نانومترا. وإذا ما نظرنا جيدا إلى الشكل فسوف نلاحظ وجود خطوط وهمية أفقية وأخرى مائلة، تمثل أماكـن وجـود ذرات المادة التي تتكاثف أعدادها داخـل الحبيبة الواحدة، بينمـا يقل وجود هذه الذرات على المناطـق الفاصلة بين الحبيبات.. وإذا مـا افترضنا أننا قمنا بفصل تلك الحبيبات بعضها عن بعض عند مناطق حدودهـا البينيـة الفاصلة بينها، فسـنجد أن كثافة وجـود الذرات على السطح الخارجي الذي نشأ عن فصل الحبيبة «هـ» (على سبيل المثال) قد ازداد، حيـث إنهـا - أي الذرات - لم تعد تكمن داخل لُب الحبيبة، كما هو موضح بالشكلين (3 - 6) و(3 - 7).



الشكل (3 - 6): رسم توضيحي يبين (أ) شكل الحبيبة «هـ» بالشكل السابق بعد أن فصلت عن جاراتها من الحبيبات المتاخمة (أ، ب، جـ، د، و) حيث أُتيح للذرات أن توجد عند مناطق حدود أسطحها الخارجية، كما هو موضح بتكبير أعلى في الشكل (3 - 7). وتزداد النسبة المئوية لكثافة الذرات على الأسطح الخارجية للحبيبة كلما تناقصت مقاييس أبعادها، كما هو مبين بالرسم في الشكلين «ب» و«جـ».

ومن خلال تناول العديد من نتائج الأبحاث المنشـورة الخاصة بدراسة تأثيـر حجم الحبيبات على الخـواص المختلفة للمادة، فقد ثبت أنه إذا ما تم التحكـم في أقطـار وأبعاد حبيبات المواد بحيث يتـم تصغيرها إلى ما دون 5 نانومتـرات فإن مردودا إيجابيا على جميع خواص المادة [12 - 15]. فكلمـا صغُرت أقطار حبيبات المادة لتصل إلى نحو 3 نانومترات فإن نحو

50 في المائة من العـــدد الكلي للذرات الموجودة في الحبيبة الواحدة تتركز على سطح الحبيبات في مناطق الحدود الفاصلة بينها، مما يعني زيادة في الكثافة العددية للذرات الموجودة في تلك المناطق.



الشكل (3 7): صورة مجهرية أخذت بواسطة المجهر النافذ الإلكتروني عالي الدقة توضح التركيب الداخلي للحبيبة «هـ» المبينة في الشكلين (3 5) و(3 6) ووجود الذرات داخل لب الحبيبة وعلى حدودها الخارجية.



4

المواد: من التقليدية إلى الابتكار

طالعنا معا في الفصول السابقة مدى الجهد الكبير الذي بذله العلماء طوال أربعة قرون كي يصلوا إلى تعريف محدد ودقيق للمادة وخواصها، ومعرفة مكوناتها الدقيقة من الذرات والجزيئات، ودورها في رسم خواص وسمات المادة. وفي إطار هذا الكم الهائل من المواد، وعلى الرغم من صعوبة حصرها أو تحديد أرقام دقيقة لأنواعها، نستطيع تصنيف المواد[1] التي يستخدمها الإنسان إلى فئتين رئيسيتين هما:

- فئة المواد التقليدية.
- فئة المواد المتقدمة.

«تضاءل استخدام مصطلح المواد المتقدمة حين برز إلى الوسط العلمي مصطلح آخر أكثر تحديداً وهو المواد النانوية...»

المؤلف

المواد التقليدية

لم يكن مقصدي من نعت تلك الفئة من المواد التي عرفها الإنسان منذ فجر التاريخ،

وما زال يستخدمها حتى يومنا هذا، «بالتقليدية» هو تهميش دورها، أو وصفها بأنها أصبحت بالية لا تجد لها أي استخدامات راهنة أو مستقبلية، بل قصدت مــن هذا التصنيف أن أخلع عليها ثوب الكلاســيكية، وذلــك لكونها مواد قد ألفنا اســتخدامها وتوظيفها في أغراض متنوعة وتطبيقات مختلفة وعديدة، وذلك منذ زمن طويل ضارب بجذوره في تاريخ البشــرية. فعلى ســبيل المثال وليس الحصر، جلود الحيوانات، ريش الطيور، أحجار البناء والزينة، كثير من عناصر الفلزات النقية مثل الذهب والفضة وكذلك سبائك النُحاس والحديد، وغير ذلك من مواد طبيعية أو من صنع الإنســان وُجدت في حياتنا، وتنوعت استخداماتها في مجالات عدة خلال رحلة الإنسان الطويلة مع الزمان والمكان ووفقا لمآربه وغاياته.

وقــد جرى العرف على تصنيف المواد التقليدية إلى عدة فئات فرعية، وذلــك وفقا لهويتها وتشــابه خواصها وتطبيقاتها فــي المجالات المتنوعة، يمكن أن نلخصها فيما يلي:

- الفلزات والسبائك الفلزية Metals and Metal Alloys،
- المواد السيراميكية Ceramics،
- البلمرات Polymers،
- المواد المتراكبة Composite Materials.

وفي إطــار هذا التصنيــف، من البديهــي أن تختلف المــواد المدرجة بــكل مجموعة في صفاتها وخواصها عن مــواد المجموعات الأخرى، ومن ثــم تتباين اســتخدامات وتطبيقات كل مجموعة من المــواد عن نظيراتها بالمجموعات الأخرى.

الفلزات والسبائك الفلزية

يُقصــد بالفلز Metal الحالة العنصرية النقية من المعدن Mineral [(2)]، مثل عناصر فلزات الحديد والنحاس والألومنيوم. هذا بينما نعني بالسبيكة الفلزيــة Metal Alloy ذلك المزيج المتجانس الناجم من تفاعل عنصرين أو أكثر من الفلزات النقية. وتنقســم المواد الفلزية إلى قسمين فرعيين: الأول ســبائك الفلزات الحديديــة التي يدخل في تركيبهــا عنصر الحديد، أما

القسم الثاني فهو سبائك الفلزات غير الحديدية التي لا يكون الحديد طرفا في تكوينها. وتتميز المواد الفلزية عامة بصفات عديدة مثل القابلية للسحب والطرق، المتانة ومقاومة الإجهادات الناجمة عن أحمال الصدم، كذلك فهي تتميز بقدرتها على التوصيل الحراري والكهربي.

ولعل سبائك الصلب المختلفة الناتجة عن صهر فلزات الحديد، الكروميوم والنيكل وبعض العناصر الفلزية الأخرى، أكثر السبائك الفلزية شهرة وذلك نظرا إلى تطبيقاتها الكثيرة والمتنوعة في المجالات المختلفة. ويحتل النُحاس وسبائكه كذلك مساحة كبيرة من الاستخدامات والتطبيقات التكنولوجية المختلفة، وعلى الأخص في مجال التوصيل الحراري والكهربي. وقد أدخل الإنسان خلال القرن الماضي، وما يزال حتى يومنا هذا، على هذه المجموعة سلسلة من سبائك الفلزات الخفيفة مثل سبائك الألومنيوم والماغنسيوم والتيتانيوم وغيرها، والتي تعد عماد صناعة الطائرات والصواريخ والمركبات بوجه عام، حيث تتطلب هذه الصناعات موادا خفيفة تتمتع بالمتانة والقوة والمرونة.

المواد السيراميكية

على النقيض من المواد الفلزية، فإن المواد السيراميكية، مثل الأكاسيد Oxides، والكربيدات Carbides، والنيتريدات Nitrides، هي مواد قصفة Brittle Materials لا تُبدي أي استعداد للطرق أو السحب والتشكيل، وذلك على الرغم من امتلاكها لعدد وافر من الخواص الميكانيكية المتميزة مثل ارتفاع قيم الصلادة Hardness لها، وقدرتها على مقاومة أحمال وإجهادات تشكيل وتشويه أسطحها الخارجية، كذلك فهي تُبدي مقاومة Strength فائقة تجاه أحمال وإجهادات الضغط فلا تنهار بسهولة إلا عند قيم عالية جدا تفوق بكثير قيم الإجهادات التي تتعرض لها في أثناء التشغيل. هذا وتتمتع المواد السيراميكية بمقاومتها العالية لعوامل التآكل بالصدأ Corrosion والبري Erosion. بيد أن هذه الفئة من المواد رديئة التوصيل الحراري والكهربي. وأود أن أشير هنا إلى أن هذا الفقر في التوصيل لا يُعد عيبا في كل الحالات، بل قد يُعد ميزة في أحيان كثيرة،

حيث تُستغَل تلك الصفة لتوظيف المواد السيراميكية في صناعة العوازل وغيرها من المواد التي تحجب انتقال الحرارة والكهرباء من وسط إلى وسط آخر ملاصق له. وهناك عديد من الأمثلة لتلك المواد مثل الأنواع المتنوعة من الزجاج، والفيبرغلاس، والمواد الداخلة في صناعة الطوب المستخدم في المباني وكذلك الطوب الحراري.

البلمرات

تنتسب البلمرات من حيث النشأة إلى المواد العضوية، حيث يدخل عنصر الكربون مكونا رئيسيا في تركيبها. وعلى الرغم من وجود أنواع متعددة من تلك المواد التي تمكن الإنسان من صنعها، أو المواد الطبيعية منها، فإن النايلون والبلاستيك والمطاط تظل مواد البلمرات الأكثر شهرة، وذلك نظرا إلى عموم تطبيقاتها في مجالات مختلفة وعديدة. وقد احتلت البلمرات منذ منتصف القرن الماضي موقعا متميزا في قائمة المواد الهندسية حتى أصبحت في أواخر القرن نفسه أكثر المواد المُنتجه على مستوى العالم، متفوقة في ذلك على الصلب الذي يبلغ إنتاج العالم منه اليوم مايقرب من مليار ونصف مليار طن سنويا.

وخلال السنوات الخمسين الماضية، ظهرت أنواع أخرى من تلك المواد حازت ثقة وشغف المستهلك، مثل البوليثيلين والبوليستر. وتشترك البلمرات عامة في عدة صفات وخواص مثل قابليتها للتشكيل، وعزلها للحرارة والتيار الكهربي، وخفة الوزن والمتانة. وتعد أيضا أكثر المواد الهندسية تميزا في مقاومة التآكل بالصدأ.

وغني عن الذكر، أن البلمرات تتفوق على جميع أنواع المواد الهندسية الأخرى في اتساع رقعة تطبيقاتها بالمجالات المتنوعة، حيث لا يكاد يخلو منتج منها. فهي تستخدم في صناعة الأقمشة والثياب، ولعب الأطفال، وأنابيب نقل السوائل مثل المياه والمواد الكيميائية، وبطانات لثلاجات حفظ الأطعمة، وصناعة عبوات حفظ الأطعمة، كذلك فهي تدخل في صناعة العديد من المنتجات الأخرى مثل المركبات بكل أنواعها، وهياكل أجهزة الهواتف والعدسات اللاصقة.

المواد المتراكبة

يُقصد بالمتراكبات Composites - ويُطلق عليها أيضا اسم المواد المتراكبة Composite Materials - تلك الفئة من المواد الهندسية التي تُنتَج عن طريق إضافة نسب وزنية أو حجمية معينة من مادة أو أكثر، تعرف بالمواد الداعمة Reinforcement Materials، إلى مادة الأساس أو مادة القالب Matrix، تُخلَط المواد الداعمة مع مادة القالب خلطا جيدا، مما يضمن الحصول على مُتراكبة متجانسة، تتوزع داخلها أجسام المواد الداعمة توزيعا مثاليا، ويُشترط في اختيار المواد الداعمة أن تتمتع بالحياد الكامل، فلا تتفاعل بعضها مع بعض أو مع مادة الأساس بحيث تكون في صورتها العنصرية الفردية داخل قالب المُنتج النهائي للمتراكبة.

ويتبلور الهدف من إنتاج المواد المتراكبة بهذه الكيفية في إضافة خواص معينة إلى مادة القالب أو إضافة سمات وصفات لم تكن متأصلة بها. فعلى سبيل المثال، المادة الرئيسية المكونة لإطار السيارات هي المطاط، والمطاط من البلمرات المعروفة عنها سهولة التشكيل عند تعرضها لأدنى قيم من الضغوط، لذا ليس من المنطقي أن يوظَّف المطاط الخالص لصنع هذه الإطارات التي تتعرض لعدد من الضغوط المعينة في أثناء سير المركبة؛ لذا تضاف طبقة متشابكة من أسلاك الصلب الرفيعة السُمك لتدعيم المطاط المستخدم، مما يرفع مقاومته للإجهادات التي يتعرض لها في أثناء الاستخدام.

وتُعد متراكبة الخرسانة المؤلفة من قالب أسمنتي - مادة الأساس - المُضافة إليه أنواع مختلفة من المواد الداعمة مثل الزلط، ومواد سد الفجوات والفراغات به مثل الرمل، وإضافات أخرى متعددة، من أشهر وأقدم المواد المتراكبة التي عرفها الإنسان. وغني عن الذكر أن الزلط بعد إضافته وخلطه مع الأسمنت يؤدي إلى رفع قيم مقاومة الأسمنت تجاه إجهادات الضغط التي يتعرض لها المنشأ بصفة مستمرة.

مثال تطبيقي آخر لتلك الفئة من المواد، هو إنتاج المتراكبات الداخلة في صناعة المركبات الجوية والفضائية، حيث تضاف ألياف الكربون Carbon Fibers إلى سبائك الألومنيوم والتيتانيوم الفلزية المستخدمة في صناعة أجسام وهياكل هذه المركبات، وذلك بنسب حجمية مختلفة، وقد تُضاف

مواد أخرى مع ألياف الكربون. وتعمل هذه الإضافات على تحسين وتطوير الخواص الميكانيكية للسبيكة الفلزية من مادة الأساس ووقايتها من خطر الانهيار عند تعرضها للضغوط الجوية المختلفة عند درجات حرارة متباينة في أثناء رحلاتها بالفضاء الخارجي، بالإضافة إلى أن تلك المواد المضافة تعمل على زيادة مقاومة السبيكة ضد عوامل الصدأ خلال فترة وجودها في ظروف بيئية وجوية قاسية، تمتد عادة لعدة شهور أو لبعض من السنوات.

المواد المتقدمة

كثيرا ما يتردد على مسامعنا في الآونة الأخيرة ما اصطلح على تسميته بالمواد المتقدمة Advanced Materials[3]، وعن تطبيقاتها الفريدة في المجالات الصناعية والطبية المتنوعة [4]. ويتواكب استخدام هذه المواد مع الطفرة الحضارية والتكنولوجية التي نعيشها منذ منتصف القرن الماضي. وعلى الرغم من هذا كله، فإنني أشعر - وقد أكون مخطئا - بأن مصطلح المواد المتقدمة أصبح مصطلحا فضفاضا وهلاميا، وذلك نظرا إلى ضخامة العدد المُنتج من المواد الجديدة في الفترة القصيرة الماضية. وعموما وبعيدا عن الآراء الشخصية، فإن طائفة المواد المتقدمة تشمل المواد المتراكبة المتقدمة Advanced Composite Materials [5] والزجاج الفلزي Glasses Mctallic [6] والمواد غير المتبلورة، والتي تُعرف باسم المواد الأمورفية Amorphous Materials [7]، وقد تضاءل استخدام مصطلح المواد المتقدمة حين برز إلى الوسط العلمي مصطلح آخر أكثر تحديدا وهو المواد النانوية Nanomaterials التي سرعان ما بزغ نجمها لتحتل مكان الصدارة في قائمة المواد المتقدمة، وذلك على الرغم من حداثة تاريخ إنتاجها في بداية السبعينيات من القرن العشرين. وسوف نتحدث لاحقا في الفصول المقبلة من هذا الكتاب عن هوية هذه المواد وكيفية الحصول عليها وتطبيقاتها التكنولوجية الرائدة التي أدت إلى ما اصطلح على تسميته بثورة القرن الحادي والعشرين، وهي تكنولوجيا النانو.

* * *

الباب الثاني

تكنولوجيا النانو
بين النظرية والتطبيق

5

ماهية المواد النانوية؟

«كل شيء في هذا الكون نسبي، تختلف قيمته وخواصه بناء على عوامل ومتغيرات عدة، من بينها ترتيب الذرات بهيكل المادة ومقاييس أبعاد المادة وحبيباتها»

المؤلف

أذن لي القارئ الكريم في أن أرافقه في رحلة قصيرة طفنا من خلالها على مراسي فصول الباب الأول من الكتاب، وتعرفنا على التطور الفلسفي لمفهوم المادة وكيف نشأت «نظرية الكم» التي ألهبت عبقرية العلماء وإبداعاتهم، بعد أن ظلت قرونا عديدة حبيسة أفكار ومبادئ الفيزياء التقليدية الصارمة. ورأينا كيف انتفض هؤلاء العلماء والفلاسفة ثائرين على تلك النظم الأزلية التي أضحت، آنذاك، مريضة عاجزة عن تفسير ظواهر فيزيائية جديدة، منذ أن سمح الله للإنسان بأن يعبر بوابات القرن العشرين، ويواجه تحدياته وصعابه الجديدة. وقد بات العالم كله، منذ بزوغ فجر القرن العشرين، يتطلع إلى من يخلصه من القضبان الفولاذية للفيزياء الكلاسيكية

التي ألجمت اجتهادات العلماء خلال القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، ولم يخيب ماكس بلانك رجاء العالم وأمانيه، فأعلن بزوغ شمس أفق جديد أسماه «نظرية الكم»، وذلك قبيل انتهاء السنة الأولى من القرن نفسه بعدة أيام.

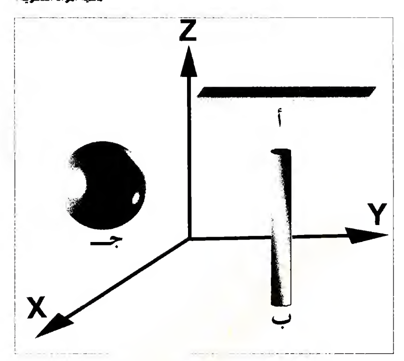
ولم تلبث هذه النظرية في الظهور حتى احتضنتها أفكار آينشتاين العبقرية ونظريته «النسـبية الرائدة»، فأخذت منها وأضافت إليها، لتكون بذلك مزيجا علميا متجانسـا ونسيجا فلسـفيا ومنطقيا متينا نعرفه باسم «علم الفيزياء الحديثة»، ولولا هذا العلم لما كان لنا أن نبحر في محيط عالم تكنولوجيا النانو وتطبيقاتها المبتكرة، وما كان لي أن أسعد بصحبة قراء هذا الكتاب!

والآن، آود أن يـأذن القارئ لي ثانيـة في أن أتجول معه عبر صفحات فصـول الباب الثاني مـن الكتاب، لنتعرف معا على هويـة المواد النانوية، وأنواعها، وكيفية تحضيرها على المستويين التجريبي والصناعي.

تصنيف المواد النانوية وتطبيقاتها

نسـتطيع القول إن جميـع أنواع المـواد التقليدية، مثل الفلـزات Metals وسبائكها، وأشباه الموصلات Semiconductors، والزجاج Glass، والسيراميك Ceramic والبوليمـرات Polymers، تعد بمنزلة الخامات الأولية المسـتخدمة في تخليق مواد ذات أبعاد نانومترية (مواد نانونية). هذا وتختلف أشكال المواد النانويـة باختلاف طريقة التحضير المسـتخدمة، حيث يمكـن أن تُحضَّر في صورة أغشـية (رقائق) نانوية Nanolayers، أو على هيئة أنابيب (أسطوانات) Nanotubes، أو أسلاك Nanowires أو عصي أوعيدان Nanorods، وكذلك في صورة حبيبات Nanoparticles. تنفرد المواد النانومترية على اختلاف أنواعها بخـواص فيزيائية، كيميائية وميكانيكية فريدة تميزها عن المواد التقليدية ذات الحبيبـات الكبيرة. وحيـث إن المواد النانوية هي بمنزلـة أحجار بناء وتصنيع المنتجات الجديدة، فـإن تمتع هذه المواد المخلقة بخواص متقدمة ينعكس على كفـاءة وأداء المنتج النهائي الذي يتم تصنيعه، حيث تتوافر فيه خواص لا يمكن توافرها في منتجات المواد التقليدية.

ويلخص الشكل (5 - 1) الأنواع المختلفة لأشكال المواد النانوية وعلاقتها بالنسبة إلى مستويات الفراغ الثلاثية (Z، Y، X). ومن الشكل، نستطيع أن نصنف المواد النانوية إلى ثلاث مجموعات رئيسية هي:



الشكل (5 - 1): رسم تخطيطي يبين الأشكال المختلفة التي تخلق المواد النانوية على هيئتها، وهي: (أ) رقائق أو طبقات نانوية (أحادية الأبعاد)، و(ب) أسطوانات أو انابيب نانونية (ثنائية الأبعاد)، و(ج) حبيبات نانوية (ثلاثية الأبعاد) [1].

● **المواد النانوية أحادية الأبعاد:** تقع تحت هذه الفئة، جميع المواد التي يقل أحد مقاييس أبعادها عن 100 نانومتر. ويعرض الشكل (5 - 1 «أ») رسما تخطيطيا لعينة من هذه الفئة وهي على هيئة طبقة مسـطحة رقيقة (جمعها رقائق) ذات سمك (بعدها الرأسي على المحور Z) نانوي. ويلاحظ من الشكل أنه لا يشترط أن يتمتع بعداها الآخران (X ، Y) بمقاييس نانوية، ومن هنا سُميت هذه الفئة بالمواد النانوية أحادية الأبعاد (أي التي لها بعد نانوي واحد فقط). ومن أمثلة هذه المواد كما ذكرنا الرقائق أو الأغشية Thin Layers مثل المواد النانوية الموظفة في أعمال طلاء الأسـطح Surface Nanocoating، كمثل التي تسـتخدم في طلاء أسطح المنتجات الفلزية بغرض حمايتها من التآكل بالصدأ، أو تلك الأفلام رقيقة السمك Thin Films المسـتخدمة في تغليف المنتجات الغذائية بهدف وقايتها من التلوث

والتلف. كذلك تُصنَّع رقائق مواد أشباه الموصلات المختلفة مثل رقائق السيليكون لتوظيفها في صناعة الخلايا الشمسية. ويبين الجدول (5 - 1) كيفية تأهيل المنتج للتطبيقات المختلفة عن طريق طلاء سطحه الخارجي برقائق النانو، وماهية الخواص التي يكتسبها سطحه ليتناسب مع تلك التطبيقات.

الجدول (5 - 1): تحسين وتطوير خواص سطح المنتج لمواكبة التطبيقات المختلفة، وذلك عن طريق طلائه برقائق النانو.

الخواص المطلوبة إضافتها إلى سطح المنتج بعد طلاء الأسطح بالمواد النانوية	أمثلة للتطبيقات ومجال الاستخدامات
• خواص ميكانيكية: زيادة في صلادة المنتج، زيادة في مقاومة الأسطح للخدش.	حماية أجزاء الماكينات والمعدات من التآكل الناتج عن الاحتكاك، زيادة في حماية أسطح المواد اللينة مثل البلمرات، الأنسجة الصناعية والأخشاب.
• خواص متعلقة بحماية سطح المنتجات من البلل والالتصاق.	تنظيف ذاتي لأسطح المنتجات وحمايتها من التصاق الغبار والشحوم عليها. لذا فإن هذه المواد تستخدم في تغطية أنسجة الأقمشة وسطوح زجاج البنايات الشاهقة.
• خواص حرارية وكيميائية: مقاومة الحرارة، العزل الحراري، مقاومة التآكل الناتج عن الصدأ.	حماية أجزاء الآلات وماكينات التشغيل والأدوات من التآكل الناتج عن الصدأ، حماية أسطح التربينات والمحركات من الحرارة الناجمة عن التشغيل، العزل الحراري للبنايات والمنشآت عن طريق الدهانات.
• خواص بيولوجية: الملاءمة البيولوجية، مضادات العدوى.	طلاء أسطح الأجهزة التعويضية بهدف رفع ملاءمتها البيولوجية لسوائل وأنسجة الجسم، طلاء أسطح الأدوات الجراحية بهدف عزلها عن المؤثرات البكتيرية ورفع مقاومتها للفيروسات والميكروبات ومنع التصاقها بسطوح تلك الأدوات.
• خواص كهربية ومغناطيسية: العزل الكهربي، مقاومة المولدات المغناطيسية.	صناعة مواد العوازل ذات الأسماك الرقيقة جدا والمستخدمة عزل الكهرباء المؤثرة على حقول الترانزستورات، بيانات الذاكرة والأقراص الصلبة المستخدمة في حفظ البيانات.
• خواص بصرية: مضادات الانعكاس الضوئي.	الأغلفة الرقيقة والأغشية المستخدمة كمضادات للانعكاس والمطبقة في دهان أسطح الشاشات والعدسات وغيرها، صناعة الخلايا الشمسية والخلايا الفوتوفولطية.

● **المواد النانوية ثنائية الأبعاد**: يشــترط فــي مجموعة هذه الفئة من المــواد النانوية أن يقل مقيــاس بعدين من أبعادها عن 100 نانومتر. وتعد الأنابيب أو الأســطوانات النانوية (Nanotubes) ومنها على سبيل المثال لا الحصر أنابيب الكربون النانوية (Carbon Nanotubes)، والألياف النانوية (Nanofibers) وكذلك الأسلاك النانوية (Nano.wires)، نماذج مهمة لتلك الفئة من المواد. وإذا ما نظرنا إلى الشكل (5 - 1 «ب»)، الذي يعرض رسما لأســطوانة نانوية، فإننا نلاحظ أن مقياسي قطري المعين، (في الاتجاهين X ، Y) بقاعدة الأسطوانة يقلان عن 100 نانومتر، هذا على الرغم من أن أطوال هذه المواد (البعد الرأســي على المحور Z) قد تمتد إلى عدة مئات من النانومترات أو الميكرومترات.

وقد أُنجزت في خلال العقدين الآخرين دراســات كثيرة واكتشــافات مثيرة تتعلق بالخواص الفريدة لأنابيب الكربون النانوية التي تحتكر لنفسها عددا كبيــرا من الخواص الكيميائية، الفيزيائية والميكانيكية غير المألوفة، كارتفاع مقاومة Strength إجهادات الشد Tensile Stress، الذي يصل إلى مائة ضعف قيمة مقاومة الشــد لسبائك الصلب مع تمتعها بانخفاض في قيمة كثافتها البالغة سدس مقدار كثافة سبائك الصلب، مما يجعلها أقوى مادة صنعها الإنســان حتى الآن. ولم يكن غريبا أن ترشّــح ترشيح أنابيب الكربــون النانوية لأن توظّف كمواد داعمة ومقويــة لقوالب الفلزات لرفع قيم صلادتها وتحســين خواصها الميكانيكية، وعلى الأخص رفع مقاومتها للانهيــار. كما أنها تجمــع خواص فريدة أخرى مثل القــدرة الفائقة على التوصيل الحراري والكهربي، علاوة على خواصها الكيميائية المتميزة. ومن المتوقع اســتخدام الأنابيب والأسلاك النانوية في تصنيع مكونات الخلايا الشمسية وشــرائح الحاســبات الإلكترونية وأجهزة الاستشعار والأجهزة الإلكترونية الدقيقة.

● **المواد النانوية ثلاثية الأبعاد**: تمثل الكريات Spheres نانوية الأبعاد، مثل الحبيبات النانوية Nanoparticles، وكذلك مساحيق الفلزات والمواد الســيراميكية فائقة النعومــة Ultrafine Powders، أمثلة لهذه الفئة من المــواد التكنولوجية المهمة، التي نعتت بأنهــا ثلاثية الأبعاد، نظرا إلى أن

مقاييس أبعادها على المحاور الثلاثة Z، Y، X تقل عن 100 نانومتر، كما هو مبين في الشكل (5 - 1 «ج»). الجدير بالذكر، أن هذه الفئة من المواد النانوية ثلاثية الأبعاد، سواء أكانت على هيئة حبيبات أم مساحيق فائقة النعومة، تتصدر قائمة الإنتاج العالمي من المواد النانوية بوجه عام، وذلك نظرا إلى تعدد استخداماتها في المجالات والتطبيقات التكنولوجية الحديثة. فعلى سبيل المثال تتوافر الآن بالأسواق مساحيق حبيبات نانوية لأكاسيد الفلزات Nanoparticulate Metal Oxides ذات أهمية اقتصادية كبيرة، حيث تدخل أكاسيد الفلزات مثل أكسيد السيليكون Silica (SiO_2)، أكسيد التيتانيوم Titania (TiO_2)، أكسيد الألمونيوم Alumina (Al_2O_3)، وكذلك أكاسيد الحديد: Magnetite (Fe_3O_4) و Hematite (Fe_2O_3) في قطاع صناعة الإلكترونيات، ومواد البناء، وصناعة البويات والطلاء، وكذلك في قطاع صناعة الأدوية والأجهزة الطبية الحديثة، لتحل بذلك محل المواد التقليدية، ولتساهم في رفع كفاءة وجودة المنتجات. ووسط هذا الخضم الهائل من الحبيبات النانوية تجيء حبيبات مركبات أشباه الموصلات مثل الكادميوم تيلوريد CdTe، وكذلك خارصينات الغاليوم GaAs على رأس قائمة المواد النانوية المستخدمة في صناعة الأدوات والأجهزة الإلكترونية الدقيقة وفي صناعة الخلايا الشمسية، هذا بالإضافة إلى استخداماتها المثيرة كموصلات للدواء Drug Delivery داخل الجسم.

وتعد فئة الحبيبات النانوية لعناصر الفلزات الحرة Nobel Metals، وعلى الأخص فلز الذهب من أهم المواد النانوية الحبيبية Nanoparticles، وذلك لأهميتها واستخداماتها في كثير من التطبيقات الطبية المتعلقة بدحر وقتل الأورام السرطانية التي تصيب أعضاء الجسم. وقد استخدمت حبيبات الذهب النانوية في تحديد سلاسل الحامض النووي DNA Sequences المرتبطة بالمرض، وكذلك في تحديد سلاسل الحامض النووي للفيروسات التي تغزو جسم الإنسان. هذا بالإضافة إلى احتكارها عددا من الخواص الفريدة تؤهلها لأن تكون المواد الأساسية لمكونات الأجهزة البصرية، البيولوجية عالية التقنية والدقة.

ماذا يميز المواد النانوية؟

بعد أن أجرينا استعراضا عاما للتطبيقات المتقدمة لمواد النانو المختلفة، وقبل أن نبدأ في الباب الثالث من هذا الكتاب وفصوله المتعددة المعنية بتقديم بعض التطبيقات العملية والرائدة لتكنولوجيا النانو في حياتنا العلمية، رأيت أولا أن نجيب معا عن سؤال يتردد دائما في جميع الأوساط غير المتخصصة في هذا المجال التقني. وكما يتفق معي القارئ الكريم، ليست تكنولوجيا النانو بعصا سحرية نحركها لنحصل منها على ما يحلو لنا من منتجات وتطبيقات إعجازية، بل هي علم وفن وإبداع يقوم على أسس وثوابت نظرية رسخها لنا علماء الفيزياء وعلوم المواد، ومازالوا يبذلون هذا الجهد المضني المتواصل الذي أرى أنه سوف يمتد معنا عقودا تلو عقود.

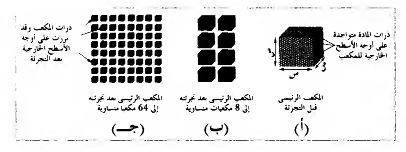
مساحة السطح

تعد مساحة السطح Surface Area لجسم ما - المساحة الكلية لأوجه أسطح الجسم الخارجية - أهم خاصية تتميز بها المواد النانوية عن غيرها من المواد التقليدية. ولإدراك الدور المهم الذي تؤديه هذه الخاصية، فلنتصور أن لدينا قطعة فلزية على شكل مكعب تتساوى مقاييس أطوال أضلاعه حيث يساوي كل منها «س»، ومن ثم فإن حجم المكعب الكلي يساوي «$س^3$» (الشكل 5 - 2 «أ»). ولنفترض أن العدد الكلي لمجموع ذرات المادة التي تحتل مواقعها داخل هيكل هذا المكعب هو 4086 ذرة، هذا في حين أن العدد الكلي للذرات الموجودة على الأسطح الستة الخارجية لهذا المكعب هو 1352 ذرة (الشكل 5 - 2 «أ»).

في إطار هذه الافتراضات، فإن مساحة الوجه الواحد للمربع سوف تكون «$س^2$» ومن ثم تكون المساحة الكلية للسطح الخارجي له تساوي «6 $س^2$». هذا يعني أن عدد الذرات الموجودة في مساحة «6 $س^2$» ستكون 1352 ذرة. وبالتالي تكون النسبة بين مساحة السطح الخارجي للمكعب وبين حجمه في هذه الحالة سوف تساوي « $\frac{6\,س^2}{س^3} = \frac{6}{س}$ ». ولنتخيل الآن أن هذا المكعب قد قمنا بتجزئته إلى ثماني مكعبات أصغر (الشكل

2 - 5 «ب») فسوف نجد أن حجم المكعب الواحد الناتج عن هذه التجزئة هو «$س^3$ / 8»، وبالتالي فإن الحجم الكلي لمجموع المكعبات سيكون مساويا لحجم المكعب الأصلي قبل تجزئته من دون أي تغيير ($8 \times \frac{س^3}{8} = س^3$). وفي الوقت ذاته، فلن يتغير مجموع العدد الكلي للذرات الموجودة بداخل المكعبات الثمانية، التي تمت تجزئتها وفصلها عن المكعب الرئيسي المبين في الشكل (5 - 2 «أ»)، حيث تظل محتفظة بالقيمة الإجمالية نفسها (4086 ذرة مقسمة على ثمانية مكعبات). بيد أن تجزئة المكعب الرئيسي - المكعب الأم - إلى ثماني قطع صغيرة لها الشكل الهندسي نفسه يؤدي إلى:

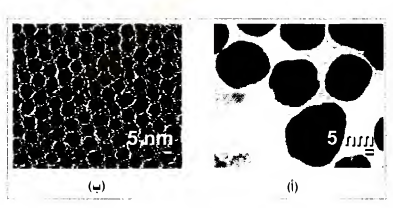
● زيادة كبيرة في مساحة الأسطح الخارجية للمكعب بعد تجزئته، وهذا يسفر عن تضاعف قيمة النسبة بين مساحة السطح والحجم بمقدار ثماني مرات، لتساوي « $8 \times \frac{6س^2}{س^3} = \frac{48}{س}$ » بعد أن كانت « $\frac{6}{س}$ ».



الشكل (5 - 2): رسم تخطيطي يبين (أ) قطعة من فلز ما على شكل مكعب تبلغ مقاييس أبعاده س X س X س. ويحتوي هذا المكعب على 4086 ذرة، منها 1352 ذرة توجد على أوجه أسطحه الست الخارجية. ويوضح الشكل في (ب) المكعبات الناشئة عن تجزئة المكعب الرئيسي في (أ) إلى ثمانية أجزاء متساوية يبلغ حجمها الكلي حجم المكعب الأساسي نفسه ($س^3$)، لكنها تتميز عنه في قيمة مجموع أوجه أسطحها الخارجية البالغ 48 وجها، توجد عليها 2388 ذرة من العدد الكلي لذرات المكعب البالغ 4086 ذرة. هذا ويتزايد مجموع أوجه الأسطح الخارجية للمكعب ليبلغ 384 وجها، تحتلها 3586 ذرة، وذلك بعد تجزئة المكعب الرئيسي إلى 64 جزءا (جـ). ومن الجدير بالملاحظة ثبات قيم العدد الكلي للذرات بالمكعب قبل وبعد التجزئة. وكذلك عدم تغير مقدار حجمه الكلي. حيث إن المتغيرات الناجمة عن تصغير المكعب الرئيسي تكمن في عدد الذرات الظاهرة على الأوجه الجديدة الناشئة من التقسيم، وتضاعف قيمة المساحة السطحية للمكعب [1].

● زيادة كبيرة في قيمة مقدار العدد الكلي للذرات الموجودة على الأسطح الخارجية لأوجــه المكعبات الثمانية الناتجة (48 وجها) لتصبح 2388 ذرة. هــذا في حين لــم يتغير مجموع العــدد الكلي للذرات الموجــودة بالمكعبات الثمانيــة ككل عما كانت عليــه قبل تجزئة المكعب الأصلــي. ومن ثم تكون النســبة بين عدد الذرات على السطح الخارجي للمكعبات إلى العدد الكلي للــذرات بوحدات المكعب الثمانية قــد تضاعفت من $\frac{1352}{4086}$ X 100 = 33% إلــى $\frac{2388}{4086}$ X 100 = 58%، وهذا في حــد ذاته يعني وجود أكثر من نصف قيمة ذرات المادة على الأسطح الخارجية للمكعبات الثمانية المجزأة.

● ومع اســتمرار التجزئة لكل مكعب مــن المكعبات الثمانية إلى ثمانية مكعبات أصغر، ســوف نحصل على 64 مكعبا متناهيا في الصغر (الشكل 5 - 2 «أ»)، تحتــوي علــى 384 وجهــا (64 مكعبــا X 6 أوجــه). وهذا بالتالي يؤدي إلى تضاعف القيمة الاجمالية لمســاحة الأسطح، مما يسفر عــن تضاعف ظهور ذرات جديدة من المادة على الأســطح الخارجية لهذه المكعبات الجديدة كي يصل عددها الكلي إلى 3586 ذرة، وهي بذلك تمثل نحو 88% من العــدد الإجمالي الكلي للذرات الموجودة داخل جســيمات المكعبات (4086 ذرة).

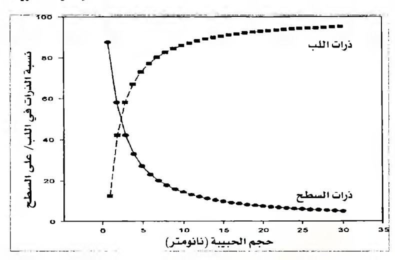


الشكل (5 - 3): صور مجهرية بواسطة الميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة لعينتين لحبيبات الفضة النانوية حضّرهما مؤلف هذا الكتاب عند ظروف معملية مختلفة. والشكل يوضح أن متوسط أقطار الحبيبات بالعينة (أ) يبلغ نحو 35 نانومترا، بينما تبلغ هذه القيمة نحو 5 نانومترات في حالة العينة (ب) [(2)].

ولنأخذ الآن فكرة نموذج تصغير المكعب الواردة في الفقرة السابقة كي نسترشد بها حين ننظر إلى الشكل (5 – 3) الذي يوضح صورتين من صور الميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة لعينتين من عينات الحبيبات نانونية لفلز الفضة تم تحضيرهما باستخدام الطرق الكيميائية تحت ظروف معملية مختلفة [3]. ويلاحظ في الشكل (5 – 3 «أ») أن حبيبات الفضة التي يصل أعدادها إلى أقل من عشر حبيبات يبلغ متوسط أقطارها نحو 35 نانومترا، تحتل مساحة سطحية (مساحة منطقة الصورة الموجودة بها الحبيبات، حاصل ضرب طول الصورة (3.7 نانومترات) في عرضها (4.1 نانومترات) تبلغ نحو 9481 نانومترا مربعا. هذا في حين تحتل المساحة نفسها ما يزيد على مائة حبيبة من الفلز نفسه، لكنها لا تزيد متوسط أقطارها على 5 نانومترات، كما هو موضح في الشكل (5 – 3 «ب»). ولأن الحبيبات النانوية المتدنية إلى هذا البعد الذي لا يتعدى طول قياسه 5 نانومترات، تحتوي على ما يقرب من 30 ذرة على أسطحها الخارجية، فإننا بذلك نستطيع القول بأن أكثر من 3000 ذرة من ذرات فلز الفضة توجد في هذه المساحة السطحية الصغيرة. ويسبب هذا التكاثف العددي من ذرات العنصر زيادة درامية في شدة فاعليته ونشاطه، وتغيرا في خواصه الفيزيائية والميكانيكية ليظهر بذلك خواص أخرى جديدة تختلف تماما عن تلك الخواص والصفات التقليدية التي تبديها حبيباته الكبيرة.

هذا وتشير نتائج بحثية أخرى إلى أن نسبة وجود الذرات على الأسطح الخارجية لحبيبات فلز الحديد النانوية التي صُغِّرت مقاييسها إلى 3 نانومترات، تصل إلى نحو 50% من إجمالي العدد الكلي للذرات الموجودة بالحبيبات [4]، هذا في حين لا تتجاوز هذه النسبة 5% فقط في حالة الحبيبات كبيرة المقاييس من المادة نفسها، والتي تبلغ مقاييس أقطارها نحو 30 نانومترا.

ويبين الشكل (٥ – ٤) العلاقة بين وجود ذرات المادة على سطح Surface Atoms، ولب Bulk Atoms حبيبات فلز الحديد عند مقاييس مختلفة لأقطار الحبيبات Particle Size. ومن الشكل الموضح نستطيع أن نستنتج العلاقة العامة التي تربط بين تلك المتغيرات الثلاثة، والتي تشير إلى أنه مع تناقص مقاييس أقطار الحبيبات، تزداد أعداد ذرات المادة على الأسطح الخارجية للحبيبات، في الحين الذي تتناقص فيه أعداد الذرات الموجودة بقلب – لب – تلك الحبيبات.



الشكل (5 - 4) : العلاقة الرابطة بين نسب وجود ذرات فلز الحديد (المحور الرأسي) على الأسطح الخارجية لحبيباته Surface Atoms ومتوسط مقاييس أبعاد تلك الحبيبات (Particle Size المحور الأفقي). ومن الشكل تتجلى لنا تلك العلاقة التي تربط بين مقاييس أبعاد الحبيبات ونسبة وجود الذرات بلب الحبيبات Bulk Atoms حيث يتضح أنه مع تناقص أبعاد أقطار الحبيبات تزداد نسبة وجود ذرات الحديد على السطح مما يحسن من الصفات المختلفة لهذا الفلز، ويضيف إليه صفات أخرى جديدة لم تكن موجودة فيه من قبل [4].

خواص المواد النانوية

بعد أن استعرضنا خلفية نظرية مبسطة عن تأثير تصغير حبيبات المواد النانوية في زيادة مساحة أسطحها وكيف تتضاعف أعداد الذرات على تلك الأسطح الخارجية للحبيبات، سوف نلقي الضوء في هذا الجزء على أمثلة من الخواص المختلفة للمواد النانوية ونواحي انفرادها بسمات وخصال لم تكن معروفة من قبل.

- الخواص الميكانيكية

أشرنا فيما سبق إلى أن تصغير مقاييس أبعاد المواد الرامي إلى إنتاج حبيبات نانوية الأبعاد يؤثر بالإيجاب على كل خواص المادة ويميزها عن مثيلتها من المواد المناظرة التي لها التركيب الكيميائي نفسه. وتأتي

الخواص الميكانيكية للمادة على رأس قائمة تلك الخواص المستفيدة من صغر أحجام الحبيبات ووجود أعداد ضخمة من ذرات المادة على أسطحها الخارجية. فعلى سبيل المثال، ترتفع قيم الصلادة Hardness [5] للمواد الفلزية وسبائكها وكذلك تزيد مقاومتها Strength [6] لمواجهة إجهادات الأحمال المختلفة الواقعة عليها، وذلك من خلال تصغير مقاييس حبيبات المادة والتحكم في ترتيب ذراتها [7].

ويؤدي تصغير مقاييس حبيبات المواد السيراميكية إلى اكتسابها مزيدا من المتانة Toughness [8]، وهي صفة لا توجد في مواد السيراميك المعروفة بقصافتها Brittleness [9] ومقاومتها للتشكيل Deformation [10]، وقد أظهرت نتائج الأبحاث الرامية إلى تطوير المواد السيراميكية ورفع قيم متانتها وقابليتها للتشكيل وتحمل إجهادات الصدم Impact، إلى تخليق أنواع جديدة من تلك المواد تستأثر لنفسها الجمع بين صفة المتانة العالية والقابلية للتشكيل، علاوة على تمتعها بالصلادة الفائقة وارتفاع مقاومتها للإجهادات الخارجية والصمود أمام قيمها العالية. وقد تأتى ذلك كله من خلال تصغير حجم حبيبات المادة إلى ما دون 10 نانومترات [11].

وقد فتحت تلك الأبحاث وغيرها الباب على مصراعيه أمام الفئات الجديدة من المواد النانوية كي تُستخدَم وتوظَّف في مجالات متنوعة مثل مجال القواطع الحادة وأدوات الحفر فائقة الصلادة والمتانة المستخدمة في مجال حفر آبار البترول والمياه. كذلك تستخدم تلك الحبيبات في مجال تغطية الأسطح المعرضة لعوامل الصدأ والتآكل. فعلى سبيل المثال، تستخدم حبيبات كربيد التيتانيوم [12] وكربيد التجستن [13] في تصنيع تلك العدد وأدوات القطع والحفر المستخدمة في تقطيع الأجسام شديدة الصلادة، وكذلك في الوصول إلى مكامن زيت النفط وبحيرات المياه الجوفية من خلال التعامل مع صخور الطبقات الجيولوجية عالية الصلادة، وذلك بدلا من استخدام مادة الماس الأسود مرتفع الثمن، والذي تنخفض خواصه عن خواص هذه المواد النانوية الجديدة.

تجد الحبيبـــات النانوية الآن مرتفعة الصلادة والمتانة، مثل حبيبات مادة أكســـيد الألومنيوم وأكسيد الزركونيوم مجالا تطبيقيا مهما، حيث توظَّـــف في تغليف الأســـطح الداخلية لأســـطوانات المحركات من أجل زيـــادة العمر الافتراضـــي لتلك المحركات ووقايتها مـــن التآكل بالصدأ الـــذي تتعرض له في أثناء التشـــغيل نتيجة لتلامـــس مكوناتها الفلزية بعضها مع بعض، خاصة في الأماكن المرتفعة الحرارة والتي تفقد معها الزيوت المستخدمة في التبريد كفاءتها، وذلك نظرا إلى انخفاض كثافتها عند تلك الظروف السيئة من التشغيل. وقد أدى استخدام تلك الأغلفة الواقيـــة إلى عدم تغير مقاييس أبعاد أســـطوانات المحركات والمحافظة على أشـــكالها وأبعادها الأصلية، الأمر الذي زادت معه كفاءة المحركات وانخفضت معدلات استهلاك الوقود وزيوت التشحيم والتبريد، مما نتج عنه انخفاض في كمية عوادم الاحتراق.

وتعمد بعض من شـــركات إنتاج الســـيارات إلـــى إضافة مواد داعمة مخلقة من الحبيبات النانوية للأكاسيد الفلزية، وكذلك الكربيدات، إلى الســـبائك الفلزية المستخدمة في إنتاج أجســـام وهياكل تلك السيارات، وذلـــك بغرض رفع قدرتها على تحمل الصدمـــات الناتجة عن الحوادث المرورية الخفيفة والمتوسطة.

وتعـــد الأغلفـــة المؤلفة من حبيبـــات النانو الفلزية التـــي تُدمَج مع حبيبـــات أخرى من مواد ســـيراميكية، أحد المفاتيح الرئيســـية المهمة الموظفة في صناعة أجســـام الطائرات والمركبـــات الفضائية الأخرى، وتحاشي ظاهرة الإجهادات الواقعة عليها نتيجة تعرض أجسام هياكلها الخارجية للوهن والضعف الذي كان السبب الرئيسي لوقوع الكثير من حوادث تحطم طائرات الركاب بشـــكل ملحوظ خـــلال النصف الثاني مـــن القرن العشـــرين. وتعمل الحبيبات النانويـــة المكونة للأغلفة التي تغطَّـــى بها أســـطح هياكل المركبات الفضائية بمنع امتداد أي شـــروخ تقع على الجســـم ووقف تقدمهـــا وزحفها، مما يحافظ على ســـلامة ومتانة الطائـــرات، ويزيد من أعمارها الافتراضية إلى نســـب تتراوح بين 200% و300%. تجدر الإشارة إلى أن ارتفاع قدرة المواد النانوية

في وقف امتداد الشـــروخ بأجســـام المركبات الفضائية ناتج عن تناهي صغر مقاييس أبعـــاد حبيباتها، مما يعني زيادة كبيرة في عدد الحدود الحبيبية التي تقوم بوقف وصد امتداد الشرخ وزحفة في الجسم الفلزة للمركبة. أي أنه مع تناقص أبعاد الحبيبات وصغرها إلى ما دون 100 نانومتـــر، تزداد أعدادها ومن ثم تـــزداد أعداد حدودها الحبيبية التي تفصل كل حبيبة عن الأخرى، كما سبق أن تم تناولناه في الفصل الثالث من هذا الكتاب.

النشاط الكيميائي

تعد الزيادة الكبيرة في مســـاحة أسطح الحبيبات النانوية ووجود عدد ضخـــم من ذرات المادة على أوجه أســـطحها الخارجية، هما العامل الأهم والمؤثـــر في زيادة النشـــاط الكيميائي للمواد النانوية، ممـــا يضعها دائما على رأس قائمة المـــواد المرغوب في اســـتخدامها بالتطبيقات الكيميائية المختلفة. كما تعد المحفـــزات النانوية Nanocatalysts المؤلفة من حبيبات فائقة النعومـــة، والتي لا تتعدى مقاييس أقطـــار حبيباتها الداخلية 100 نانومتر، أحد أهم الأمثلة التطبيقية لهذه الفئة من المواد وأكثرها انتشارا. وتتفاعل حبيبات المحفزات النانوية بقوة مع الغازات الســـامة والضارة مثل أول أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين المختلفة الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري سواء في المحولات الكهربية والسيارات والمعدات، مما يرشحها لأن تؤدي الدور الأهم والرئيسي في الحد من التلوث البيئي بهذه المركبات العضوية شديدة السمية.

وتعـــد خلايـــا الوقـــود Fuel Cells أحـــد التطبيقـــات الأكثـــر أهمية للمحفـــزات النانوية المصنوعة من حبيبات الفلزات النبيلة Nobel Metals Nanoparticles، مثل فلز البلاتين Pt ومجموعته. ولعل المســـتقبل القريب سوف يحمل لنا اكتشافات علمية مثيرة عن إمكان استخدام حبيبات نانوية من سبائك فلزية أقل تكلفة من مجموعة فلز البلاتين وسبائكه، مما يمكننا من اســـتخدام تكنولوجيا خلايا الوقود بطريقة اقتصادية تفتح الباب نحو انتشارها وتعميمها كأحد أهم مصادر الطاقة الجديدة.

كما تعد المحفزات النانوية المستخدمة في تكرير النفط نموذجا تطبيقيا مهمــا لتلك الفئة من المحفــزات النانوية، على الرغم مــن ارتفاع تكاليف إنتاجها على المستوى الصناعي وبالكميات الضخمة التي تتطلبها عمليات تكريــر زيت النفط. على أي حال، فإن وجود هذا الكم الضخم من الذرات على الأســطح الخارجية لحبيبــات المحفزات النانوية يزيــد من فاعليتها وتحفيزها الكيميائي، حيث إنها تشــارك بأســطح حبيباتها الخارجية في تلــك العمليات الكيميائية. هذا بالإضافة إلــى أن تلك الحبيبات المتناهية في الصغر تتمتع بمساحة أسطح عالية جدا، وهذا يعني أنه عند استخدام كتلة وزنية معينة من المحفزات نانوية الحبيبات تكون فاعليتها أعلى بكثير من الكتلة نفســها الوزنية لنوع المحفز الكيميائي نفسه المؤلف من حبيبات كبيرة الأحجام.

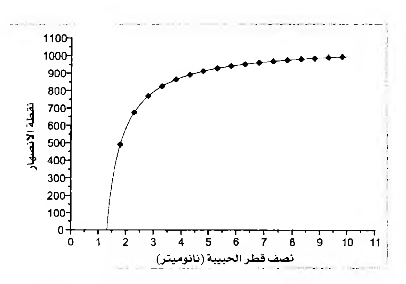
● الخواص الفيزيائية

نقطة الانصهار

تتأثــر قيم درجــات حرارة انصهــار المادة بتصغير أبعــاد مقاييس حبيباتها. فعلى ســبيل المثــال، فإن درجة الحرارة التــي يحّول عندها تحــول فلز الذهــب النقي من الحالة الصلبــة Solid State إلى الحالة السائلة Liquid State تعرف باسم نقطة الانصهار - Melting Point ، هــي 1064 درجة مئوية. والســؤال الذي يطرح نفســه الآن، هل تتغير هــذه القيمة مع تغير أوضــاع وترتيب ذرات فلز الذهــب الناجمة عن تصغيير مقاييس أبعاد حبيباته وزيادة مساحة أسطحه الخارجية؟ يتيح الشــكل (5 – 5) إجابة مباشــرة عن هذا السؤال، حيث يوضح العلاقة الطردية التي تربط بين نقطة انصهار فلز الذهب ومقياس أبعاد أقطار حبيباته. وكما هو موضح بالشــكل، فإن قيمة نقاط انصهار فلز الذهب تختلــف باختلاف مقاييس أبعاد أقطار حبيباته، حيث تتناقص بتناقص أقطار تلك الحبيبات تناقصا ملحوظا، لتصل إلى نحو 500 درجة مئوية عنــد تدني مقياس أقطار حبيبات الذهــب إلى نحو 1.35 نانومتر [4]، هذا على الرغم من تســاوي حبيبات الذهب ذات الأقطار المختلفة في

التركيب الكيميائي وخلوها من الشوائب. ومن هذه العلاقة يتضح لنا أنه بالإمكان التأثير في خواص وسلوك المادة من خلال تصغير مقاييس حبيباتها، مما يؤدي إلى تخليق عدة مواد من المادة الرئيسية نفسها بحيث تختلف كل منها عن الأخرى في الخواص والصفات اختلافا كبيرا، وهذا يؤدي إلى اتساع رقعة التطبيقات التكنولوجية للمادة، ومن دون إضافة، أي مواد أو عناصر أخرى إليها كما هو متبع في تكنولوجيا تخليق المواد التقليدية حيث تضاف مادة أو أكثر إلى المادة الرئيسية لتغيير صفات معينة أو خواص بها.

ويبرر علماء الفيزياء سبب تناقص قيم نقط انصهار المادة مع تناقص مقاييس حبيباتها إلى الزيادة الطارئة على مساحات أسطحها الخارجية واختلاف مواضع وترتيب ذرات فلز الذهب عما كانت عليه.



الشكل (5-5) : يمثل الشكل العلاقة التي تربط بين قيم درجة حرارة نقطة انصهار حبيبات الذهب الخالص (المحور الرأسي) وأنصاف أقطار تلك الحبيبات (المحور الأفقي). ومن هذه العلاقة المبينة بالشكل نستطيع القول إن التلاعب في أوضاع ذرات حبيبات الذهب الناجم عن تصاعد نسب وجود هذه الذرات على الأسطح الخارجية لحبيباته قد غير الخواص الفيزيائية للذهب ومن بينها قيمة درجة حرارة الانصهار له [4].

• الخواص البصرية

بالإضافة إلى ما سـبق شـرحه من الخواص المهمة التي تتميز بها المواد النانوية، فقد استحوذت تلك المواد على اهتمام الباحثين والعلماء العاملين في مجال البصريات وذلك نظرا إلى الخواص غير المسبوقة التي تمتلكها تلك المواد، حيث تختلف في خواصها البصرية عن نظائرها من المواد التقليدية كبيرة الحبيبات. ومن المثير للدهشة امتداد تأثير حجم الحبيبـات إلى تغيير الخواص البصرية للمـادة Optical Properties، ومنها التشتيت أو التكسـير الضوئي Light Scattering لسطح المادة. فعلى سبيل المثال، فإن اللون المعروف لحبيبات الذهب النقي التي تزيد أقطارها على 200 نانومتر هو اللون الذهبي الأصفر الذي نعرفه. لكن إذا مـا تم تصغير هذه الحبيبات إلى أقل من 20 نانومترا، فإنها تكون عديمة اللون (شـفافة)، ومع زيادة تصغيـر الحبيبات تظهر الحبيبات ألوان مختلفة من الأخضر إلى البرتقالي ثم الأحمر، وذلك وفقا لقيم مقاييـس أبعاد أقطارها. وينعكس تصغير أحجام حبيبات الذهب على قـدرة تلك الحبيبات لمقاومة التكسـير الضوئي وجمعهـا بين انبعاث طيفـي ضيق المدى Sharp Emission Band وطيف اسـتثارة واسـع المدى Broad Excitation.

ويعد مجال الإلكترونيات والبصريات أحد أهم المجالات التطبيقية الخاصـة بالمواد النانويـة التي تجمع فـي خواصها صفـات بصرية وقـدرة فائقة علـى التوصيل الكهربي، مثل حبيبـات الفضة، الذهب، وكذلك أنابيب الكربون النانوية، حيث تُسـتخدم هذه المواد في صناعة الشاشات عالية الدقة فائقة التباين ونقاء الألوان، مثل شاشات التلفاز والحاسبات الحديثة.

• الخواص المغناطيسية

تعتمـد قوة المغناطيس اعتمادا كليا علـى مقاييس أبعاد حبيبات المادة المصنـوع منها المغناطيس. وكلما صغرت تلك الحبيبات وتزايدت مسـاحة أسـطحها الخارجية ووجود الذرات على تلك الأسـطح، كلما ازدادت قوة

وفعالية المغناطيس وشدته. وتعد المواد النانوية ذات الخواص المغناطيسية أهم مصادر المواد التي تدخل في إنتاج المغناطيسات فائقة الشدة المستخدمة في المولدات الكهربية الضخمة، ومحركات السفن والبواخر العملاقة. كما تدخل الحبيبات النانوية للمواد المغناطيسية في صناعة الأجهزة التحليل فائقة الدقة وكذلك في صناعة أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي Magnetic Resonance Imaging (MRI) وكذلك في أجهزة التشخيص الطبي Medical Diagnostics بوجه عام.

• الخواص الكهربية

أثر تناهي صغر أحجام حبيبات المواد النانوية وكثافة أعداد الحدود الحبيبية بالإيجاب على خواصها الكهربية التي تتمثل في قدرتها الفائقة على توصيل التيار الكهربي. وتستخدم المواد النانوية الآن في صناعة أجهزة الحساسات الدقيقة والشرائح الإلكترونية بمختلف الأجهزة الحديثة. كما تستخدم بكثافة في صناعة مكونات الهواتف الخلوية والحاسبات، مما مكن هذه القطاعات الصناعية من إنتاج أجهزة خفيفة الوزن عالية المواصفات التقنية، وفي الوقت نفسه منخفضة التكلفة.

ويعطي الجدول (5 - 2) بيانا لبعض الخواص التي يتم تطويرها في المنتجات المختلفة عن طريق تصغير حبيبات المواد إلى أقل من 100 نانومتر. ويتضح لنا من تلك الأمثلة المتعددة أنه من المنطقي ألا تتبع المواد النانوية في حركتها وفي تفاعلاتها وسلوكياتها، كلاسيكيات نيوتن الخاصة بقوانين حركة الأجسام الضخمة وتفاعلاتها. لذا فإنه في إطار تفهمنا لميكانيكا الكم وبعد مرور مائة وعشرة أعوام على تلك النظرية الرائدة التي فجرتها جهود ماكس بلانك، ثم أعقبتها إنجازات آينشتاين الفذة ونظرياته لترسيخ قواعد الفيزياء الحديثة، فقد أدركنا أن الخواص المتميزة التي تحتكرها المواد النانوية السابق توضيحها، ترجع كنتيجة مباشرة لتصغير حجم حبيباتها. ويأتي التأثير الكمي Quantum Effect على تلك الحبيبات النانوية متناهية الصغر ليحسن ويعزز من تلك الخواص والخصال، وذلك وفقا لنظرية ميكانيكا الكم التي جاءت لتصحح قوانين نيوتن الكلاسيكية.

ولعـــل تلك الأمثلة قد أكدت للقارئ الكريم خطأ الفيزياء الكلاســـيكية حـــين آمنت بالعديد من المثاليات النظرية ومن بينها أزلية المادة وصمودها في مواجهة أي متغيرات ترمي إلى تغيير خواصها وسماتها. فكل شيء في هذا الكون نسبي، تختلف قيمته وخواصه بناء على عوامل ومتغيرات عدة، من بينها ترتيب الذرات بهيكل المادة ومقاييس أبعاد المادة وحبيباتها.

الجدول (5 - 2): أمثلة توضح كيفية تحسين وتطوير خواص المنتجات ورفع كفاءتها عن طريق التحكم في مقاييس أبعاد حبيباتها لتكون أقل من 100 نانومتر.

الخواص	أمثلة
الكهربية Electrical	زيادة التوصيل الكهربي والمغناطيســي في الســيراميكيات والمتراكبات النانوية، زيادة في المقاومة الكهربية بالفلزات.
المغناطيسية Magnetic	زيادة القوة المانعة المغناطيسية Magnetic Coercivity.
الميكانيكية Mechanical	تحســين الصــلادة Hardness، المتانــة Toughness في الفلــزات والســبائك الفلزية. تحســين اللدونــة Plasticity والقابلية للسحب Ductility في المواد السيراميكية القصفة.
البصرية Optical	زيــادة وتطويــر القدرة الكميــة لبلورات أشــباه الموصلات Quantum Efficiency of Semiconductor Crystals.
البيولوجية Biological	تحســين التلاؤم والتوافق البيولوجي Biocompatibility، زيادة قدرة النفاذية والاختراق للموانع والحواجز البيولوجية Biological Barriers التي تعوق وصول الأدوية والعقاقير العلاجيــة للجزء المصاب (مثل الأغشــية Membranes. الحاجز الدموي بالمخ Blood-brain Barrier).



6

تقنيات الإنتاج والتوصيف

«منذ أن بدأت البشرية رحلتها مع تكنولوجيا النانو، داعبت خيال العلماء والباحثين وهيمنت عليه فكرة التلاعب الفردي بذرات وجزيئات المادة وترتيبها على هيئة نماذج وأشكال لتكوين البنية الداخلية لهياكل الأجهزة المراد إنتاجها، مهما بلغت أحجامها وكبرت مقاييس أبعادها أو صغرت»

المؤلف

بعد أن انتهينا من إلقاء الضوء على ملامح تطبيقات تكنولوجيا النانو وما يمكن أن تحققه للبشرية من آمال عريضة وقفزات تكنولوجية عملاقة باتت صعبة أو مستحيلة في ظل التكنولوجيات التقليدية، فقد تبين لنا أن العالم كله - من غني إلى فقير - على حافة ثورة تكنولوجية عملاقة قادرة على تحويل أحلامه من وهم إلى حقيقة وواقع ملموس. سوف يشهد جيل اليوم والأجيال القادمة خلال العشرين سنة المقبلة تطورا متزايدا في مجال الطب والرعاية الصحية والاكتشاف المُبكر للأمراض، ويلمس الطفرات الهائلة التي يحققها قطاع صناعة الدواء، وسوف تزداد حياتنا نعومة وسلاسة مع تلك القفزات التي تحققها تكنولوجيا النانو في مجالات الأجهزة الإلكترونية بمختلف فئاتها.

ولكي لا يُصبح حديثنا مجرد سـرد قصصي عن حكايات أسـطورية، مسطورة في كلمات هلامية لا ترتبط بالواقع الحالي، فلا بد أن نتفق على أنه ما زال أمامنا كثير من التحديات التقنية التي تواجهنا، كي نعبر الجسر الفاصـل بين اليأس والأمل، ونقوم برأب الصدع بين الحلم والحقيقة. ولن يتأتى للبشـرية هذا إلا مـن خلال العلم والعمل البحثي الشـاق والمُضني من أجل إنقاذ أنفسـنا والأجيال المقبلة من مخاطـر التصحر ونُدرة المياه الصالحة للشـرب، والمشاكل البيئة القاتلة، ونفاد الوقود الأحفوري، وعجز الأدوية والعقاقيـر الطبية التقليدية عن مكافحـة الأمراض وردع الأوبئة الحاليـة والمتوقعة، وإلى غير ذلك من مخاطر وتحديات كثيرة باتت تؤرقنا منذ منتصف القرن الماضي.

أدوات التكنولوجيا

لكي ننجح في تطويع تكنولوجيا النانو وترويضها لتأدية المهام المُوكلة إليها، لا بد أن نعرف ماهية أدواتها ووسائلها الخاصة بإنتاج وتوصيف مُخرجاتها الرائدة، فلـكل تكنولوجيا أدواتها، التي من دونها أو من دون إتقان اسـتخدامها وتطويعها، تظل - أي التكنولوجيا - مجرد سراب أو حلم. وخلال القرنين الماضيين، عانت دولنا العربية، ودول عالمنا النامي، من غيابها فـي إنتاج تكنولوجيا الثورات الصناعيـة الكُبرى، وكان ذلك بسـبب غياب المعرفة وعدم إتقان اسـتخدام الأدوات والوسائل التقنية الموظفة في إنتاج مخرجات التكنولوجيات السابقة، كنتيجة طبيعية للتعتيم التكنولوجي على تلك التقنيات وحظر نقلها إلى دول الجنوب. تبلور هذا الحظر وأصبح واضح المعالم، بعد أقل من مائة عام من اندلاع أول ثورة تكنولوجيـة، وذلك بعد إبرام أول معاهدة تُبيح احتكار المعرفة والتقنيات التكنولوجية في باريس من العام 1883، والمعروفة باسم «اتفاقية باريس لحمايـة الملكية الصناعيـة Paris Convention for the Protection of Industrial Property ومـا تلاها، حتى يومنا هـذا، من قوانين، تَزَينت تحت اسم «قوانين حماية الملكية الفكرية» Intellectual Property، التي نحترمُها بلا أدنى شك، بل ونُشجع على ممارستها والتسلح بها، فيا ليت

العلماء والمخترعين العرب الأوائل قد أبرموا مثل هذه المعاهدات، وسنوا قوانين صارمة لحماية إنتاجهم الذهني الذي أثروا به البشرية، وقت أن كانت المعرفة حكرا على منطقتنا العربية!

لم يكن كلامي هذا بغرض إثارة شـــجون أو أحزان، ولكنني وددت فقط الإشـــارة إلـــى أن المعرفة أصبحـــت الآن كتابا مفتوحـــا للجميع، وأضحت أغلـــب الأدوات والتقنيات التكنولوجية المتقدمـــة - فيما عدا البعض منها المخصـــص في إنتاج صناعات خاصة ودقيقـــة - معروفة لدى الجميع، أو يُمكن معرفتها بوســـيلة أو بأخرى. خلاصة القول إذن أنه لا توجد لنا أي أعذار تحول دون تحقيق آمالنا وجني ثمار كفاحنا العلمي والمعرفي.

وسنتناول في هذا الفصل، ماهية الأدوات والوسائل التقنية المستخدمة في تكنولوجيا النانو. وبداية، يمكننا تصنيف تلك الأدوات إلى قسمين هما: وسائل الإنتاج Production Tools، ووسائل التوصيف Characterization Tools.

وسائل الإنتاج

على الرغم من وجود العديد من الأدوات والطرق المُستخدمة في إنتاج وتخليق المواد النانوية بمختلف فئاتها وبدرجات متفاوتة من الجودة، السرعة والتكلفـــة، فإن كل هذه الطـــرق يمكن إدراجها تحت اثنين من الأســـاليب التقنية يعرفان باسم (1) تصغير حبيبات المادة - النزول بمقاييس أبعادها من الأعلى إلى الأســـفل Top-Down Approach أو من القمة إلى القاع، (2) تجميـــع ذرات وجزيئـــات المادة - الصعود بمقاييـــس الأبعاد من القاع إلـــى القمة Bottom-Up Approach أو من الأســـفل إلـــى الأعلى. وبينما يُقصد بمصطلح «القمة» - المُســـتخدم هنا في كلتا الحالتين - الأجســـام الكبيـــرة، فإن مُصطلـــح «القاع» يرمز إلـــى مكونات المادة الأساســـية من الذرات والجزيئات أو الحبيبات فائقة النعومة. ومن التسمية، يتضح لنا أن الأســـلوبين المتبعين يعملان في اتجاهين متعاكسين، حيث تتبع استراتيجية الأســـلوب الأول في تحضير المواد النانوية سياســـة تصغير أبعاد الأجسام أو الحبيبـــات الضخمة، التي تبلغ مقاييس أبعادها عدة مئات أو عشـــرات الآلاف من النانومترات، والوصول بها إلى حبيبات فائقة النعومة لا تتعدى

أبعادهــا بضعة نانومتــرات تقل عن 100 نانومتر. هــذا في الحين الذي يســير فيه أســلوب إنتاج المواد النانوية في الطريقــة الثانية على التعامل منذ البداية مع الجســيمات نانوية الأبعاد، من ذرات المادة أو جزيئاتها، ثم ترتيبها وتجميعها على الشكل المطلوب الحصول عليه.

وبطبيعة الحال، يتمتع كل أســلوب من الأســلوبين بعــدد من المزايا الخاصة، وفي الوقت نفســه به عديد من العيوب ونقاط الضعف، الأمر الذي لا يمكن فيه اتباع أســلوب واحد فقط في تحضير كل فئات المواد والمنتجات النانوية. ويعتمد اختيار أسلوب وطريقة التحضير على ماهية الخــواص المطلــوب توافرها في المنتــج النهائي للمــادة، وهوية المجال التطبيقــي الذي ســوف يتم توظيف المُنتج به. وبوجــه عام، فإن الطرق الأكثر شيوعا واســتخداما لإنتاج المواد النانوية على المستوى الصناعي والتطبيقــي، يمكن حصرها في خمس طرق عامــة، تندرج تحتها طرق أخرى فرعية:

- طريقة الطحن الميكانيكي Mechanical Milling.
- طريقــة ترســيب الأبخــرة الكيميائيــة Chemical Vapor Deposition (CVD).
- طريقة تكثيف الــذرات أو الجزيئات Atomic or Molecular Condensation.
- طريقة الترسيب الكهربي Electrodeposition.
- طريقة الهلام - الغرواني Sol-gel.

وفــي هذا الفصل من الكتاب لن نشــرح كل هذه الطــرق، على الرغم من بســاطة فكرتها وفاعليتها في تخليق المواد النانوية من مختلف الأنواع والخواص، لكننا سوف نقدم وصفا وتحليلا مختصرين لبعضها.

نمط إنتاج المواد النانوية بأسلوب من الأعلى إلى الأسفل

يُعد أسلوب إنتاج المواد النانوية بانتهاج تقنية تصغير أحجام الأجسام الكبيرة ومســاحيقها التي قد تصل أحجامها إلــى عدة ملليمترات أو بضعة ســنتيمترات، والوصول بمقاييس أبعادهــا إلى عدة نانومترات

قليلة لا تتجاوز 100 نانومتر الأسلوب الأكثر شيوعا واستخداما، وذلك نظرا إلى قدرته على إنتاج كميات كبيرة من مساحيق وحبيبات المواد النانوية على مختلف أنواعها وفئاتها. وتتضمن تقنية تصغير الحبيبات والنزول بمقاييسها إلى الأبعاد النانوية على عدة طرق، من بينها: طريقة الطحن الميكانيكي (السحق الميكانيكي) Milling Mechanical، طريقة التذرية، باستخدام طريق أشعة الليزر -Laser Ablation، طريقة نفث الذرات بالرشرشة الكاثودية puttering [(1)] - حيث تتجمع الذرات بعضها مع بعض مكونة طبقة رقيقة Thin Layer من المادة. ويتم إجراء هذه العمليات الإنتاجية في جو منعزل تماما عن الأوكسيجين والهواء الجوي - حيث يتم إحلال أحد الغازات الخاملة بدلا منه، مثل غاز الهليوم أو الأرغون أو خليط منهما [(2)]. ومن الجدير بالذكر، أنه في حالة الرغبة للحصول على مواد نانوية لمركبات فلزية مثل النيتريدات، والهيدريدات، فإنه يتم استخدام غازات نشطة مثل غاز النيتروجين أو الهيدروجين لها القدرة على التفاعل مع الحالة الصلبة للمواد الفلزية، وذلك في أثناء إجراء عملية تصغير أحجام الحبيبات. ويرجع استخدام ما يعرف بطريقة «الحث الميكانيكي للطحن المُنشط» Mechanically-Induced Reactive Milling لتكوين حبيبات نانوية من النيتريدات الفلزية إلى العام 1992، حين تمكن مؤلف هذا الكتاب وفريق عمله لأول مرة من إنتاج حبيبات نانوية متجانسة من نيتريدات التيتانيوم TiN [(3)] عند درجة حرارة الغرفة وفي وجود غاز النيتروجين.

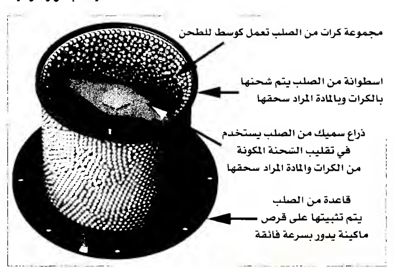
وتعتبر عملية الطحن - السحق - الميكانيكي للمواد للحصول على مساحيق نانوية البنية، من أكثر الطرق انتشارا على المستوى الصناعي والتطبيقي، وذلك لقدرتها الفائقة على تحضير كميات ضخمة من مساحيق الحبيبات النانوية المتجانسة لمجموعات متنوعة من كل أنواع المواد. لذا فقد حدثتني نفسي بأن أقوم في بداية هذا الفصل من الكتاب بعرض مبسط عن ميكانيكية طريقة الطحن الميكانيكي وكيف يحدث من خلالها تفاعل الحالة الصلبة Solid-State Reaction بين

مادتين أو أكثر لتكوين مســـاحيق Powders فائقـــة النعومة تتألف من حبيبات دقيقة نانوية الأبعاد. وســـوف يتضمن هذا الجزء أيضا، تقديم بعض أمثلة لمســـاحيق المواد النانوية التي نحصل عليها بواســـطة هذه الطريقة، وكيف يتم تجميعها وتحويلها إلى أجسام متماسكة ذات أشكال وأبعاد تتلاءم مع مواصفات المُنتج النهائي المُراد الحصول عليه لتوظيفه في الأغراض الصناعية المختلفة.

• تقنية الطحن الميكانيكي

تعد طريقـــة الطحن الميكانيكـــي Mechanical Milling باســـتخدام طواحين الكرات Ball Mills إحدى الطرق الرئيســـية المســـتخدمة بكثرة في عمليات إنتاج مســـاحيق المـــواد المختلفة، وكذلك أيضـــا في عمليات تجهيـــز الخامات، منذ زمن بعيـــد. وعلى الرغم من أن تاريخ اســـتخدام طواحين الكرات في إنتاج مساحيق حبيبات المواد النانوية يرجع إلى حقبة التســـعينيات من القرن الماضي [4]، فإن ســـنوات العقـــد الأول من القرن الحالي تشـــهد حاليا اهتماما كبيرا بهذه الطريقة وتطويرها [5] من أجل زيادة رقعة توظيفها في إنتاج فئات متنوعة من حبيبات المواد النانوية على المستوى الصناعي.

ويعتمد أسلوب الطحن الميكانيكي لسحق كتل جسيمات المواد وتنعيمها والوصـــول بمقاييـــس حبيباتهـــا الداخلية إلـــى مســـتوى النانومتر، على استخدام طواحين كرات عالية القدرة High-Energy Ball Mill. وتتألف الطاحونة بشكل عام، من أســـطوانة (وعاء الطحن) مصنوعة من سبيكة من ســـبائك الصلب - تســـتخدم مادة كربيد التنجســـتن WC في بعض الحالات - تشـــحن بجسيمات كتل المادة المُراد سحقها [6]. وقبل أن يُشرع في حكم غلق وعاء الطحن المُحتوي على جسيمات المادة، يضاف عدد من الكـــرات إليها، تفوق قيمة صلادتها صلادة المـــادة المُراد طحنها، وتكون مصنوعـــة من نفس نوع مـــادة الوعاء [7]. هذا ويوضح الشـــكل (6 - 1) رسما تخطيطيا لشكل وعاء الطحن، محتويا على الكرات التي تقوم بمهمة «الوسط الطاحن» للمادة.



الشكل (6 - 1): رسم تخطيطي ثلاثي الأبعاد يُوضح شكل ومحتويات أسطوانة من الصلب تحتوي على كرات تعمل كوسط لسحق المادة المراد الحصول على مسحوق حبيباتها النانوية (8).

ويتوقف مدى جدوى تفريغ الأسطوانة من الهواء الجوي الموجود بها وإحلاله بأحد الغازات الخاملة على هوية المادة المطلوب الوصول بأحجام حبيبات مساحيقها إلى مستوى النانومتر. فإن كانت المادة من إحدى المواد الفلزية أو سبائكها، فلا بد أن تُسحَق في معزل عن الهواء الجوي أو في وجود أحد الغازات الخاملة، وذلك لتجنب تأكسدها بواسطة الأكسيجين الموجود بالهواء. أما إذا كانت المادة المراد سحقها من إحدى المواد السيراميكية لأكاسيد الفلزات المستقرة كيميائيا، مثل أكسيد الألومونيوم Al_2O_3 أو أكسيد التيتانيوم TiO_2 وغيرهما، فيمكن إجراء عملية الطحن في وجود الهواء الجوي.

وبمجرد الانتهاء من الخطوة السابقة، يثبّت وعاء الطحن على قرص ماكينة الطحن التي تلف بسرعات عالية جدة، تتراوح بين 250 و800 لفة في الدقيقة، مما يُعجل من عملية تكسير وطحن الحبيبات الكبيرة للمادة

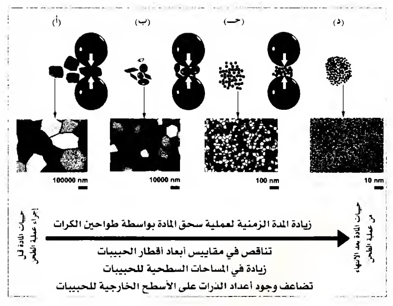
والوصول بمقاييسها إلى أبعاد نانوية في فترات زمنية قصيرة. وتتوقف كفاءة عملية الطحن في الحصول على مساحيق ناعمة تتركب من حبيبات نانوية، على عدة عوامل، نذكر من بينها:

- نوع الطاحونة المُستخدمة وقدرتها،
- نوع المادة المصنوعة منها أوعية وكرات الطحن،
- نوع المادة المُراد سحق جسيماتها وخواصها الفيزيائية والميكانيكية،
- الوسط القائم بعملية الطحن (كور، قضبان) [9]،
- النسبة الوزنية بين الوسط الطاحن والمادة المُراد طحنها [10]،
- السرعة التي يتم عندها إجراء عملية الطحن [11]،
- الزمن الكلي المُستغرق لعملية طحن المادة [12].

هذا وتختلف ميكانيكية سحق المواد باختلاف أنواعها وخواصها، فالحبيبات النانوية لمساحيق أكاسيد المواد السيراميكية القصفة يتم الحصول عليها بميكانيكية تختلف عن تلك الميكانيكية التي يتم بها الحصول على الحبيبات النانوية للمواد الفلزية المطيلة Ductile وسبائكها، وذلك على الرغم من استخدام الطاحونة نفسها وتحت ظروف التشغيل نفسها.

• تحضير مساحيق المواد القصفة نانوية الحبيبات

المواد القصفة، كما ذكرنا سابقا بالفصل الرابع، هي المواد التي ليس في وسعها أن تتشكل أو تُبدي أي رغبة في تغير أشكال هياكلها عند تعرضها لأي إجهادات خارجية. ويصور الشكل (6 - 2) رسما تخطيطيا مُبينة فيه المراحل المختلفة التي تمر بها جسيمات المواد القصفة في أثناء سحقها بواسطة طاحونة كرات عالية القدرة. وتظهر في الشكل أجسام كبيرة كروية الشكل، تُعَبر عن الكرات المستخدمة في طحن كتل جسيمات المادة المراد تنعيم حبيباتها. وترمز الأسهم الكبيرة الموجودة على سطح هذه الكرات إلى اتجاه قوى الصدم Impact Forces المؤثرة في الحبيبات، الناتجة من جراء وقوعها بين الكرات المتصادمة داخل اسطوانة وعاء الطحن متصادمتين في أثناء تشغيل الطاحونة (الشكل 6 - 2 «أ»). ويلاحظ في هذا الشكل المشار إليه، ضخامة مقاييس حبيبات جسيمات المادة قبل بداية تفتيتها وسحقها، حيث يصل متوسط أقطارها نحو 220 ألف نانومتر [13].



الشكل (6 - 2): رسم تخطيطي يوضح المراحل التي تمر بها جسيمات كتل المواد القصفة خلال عملية الطحن الميكانيكي باستخدام طواحين الكرات عالية القدرة.. ويلاحظ من الشكل، أنه مع زيادة زمن الطحن، تتناقص مقاييس أقطار الجسيمات المتكونة تناقصا دراميا، حيث تصاحب هذا التناقص زيادة في مساحات السطوح الخارجية لمساحيق الحبيبات الناتجة في كل مرحلة. ويشير هذا التناقص في مقاييس أبعاد الحبيبات إلى زيادة نسب وجود ذرات المادة على الأسطح الخارجية للناتج النهائي من حبيبات المادة النانوية [8].

وبمجرد تشغيل الطاحونة لفترة زمنية معينة، تخضع جسيمات المادة، الواقعة بين الكرات المتصادمة داخل الطاحونة، لإجهادات قوى القص Shear Forces التي تؤثر منذ البداية في مناطق الضعف الموجودة في البنية الحبيبية - الحدود البينية للحبيبات - داخل الهيكل البلوري، مما يؤثر وبشدة في ثبات واستقرار الحبيبات، فتبدأ في الاستجابة لهذه القوى المؤثرة وتتفكك عند هذه الحدود، مكونة بذلك حُبيبات أكثر نعومة ذات أقطار تقل عن 12 ألف نانومتر، كما هو مبين في الشكل (6 - 2 «ب»). ومع زيادة زمن الطحن، تتعرض حبيبات المادة لمزيد من الضغوط والإجهادات الواقعة عليها، والتي تؤدي إلى استمرارية انفصال الحبيبات بعضها عن بعض وتكوين حبيبات أكثر

نعومة، حيث يبلغ متوســط مقاييس أبعاد أقطارها نحو 30 نانومترا (الشكل 6 - 2 «جــ»). ومــع زيادة زمن الطحــن، يتوالى تأثير إجهــادات قوى القص في المادة، مما يؤدي إلــى مزيد من تنعيم حبيباتها والوصول بها إلى أحجام متناهية في الصغر، يبلغ متوسط أقطارها نحو 2 نانومتر، كما هو مبين في الشــكل (6 - 2 «د»). ويعرض الشــكل (6 - 3) صورة ميكروسكوبية حُصل عليها باستخدام الميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة، لحبيبة نانوية الأبعاد (يبلــغ مقياس قطرها نحو 5 نانومترات) من مــادة كربيد التيتانيوم TiC، وذلك بعد خضوعها للطحن لمدة 200 ساعة متواصلة [14].



الشــكل (6 - 3): صــور مجهريــة أخذت بواســطة الميكروســكوب النافــذ الإلكتروني عالــي الدقــة لحبيبة واحدة مــن حبيبات مادة كربيــد التيتانيــوم TiC حُضرت معمليا بواســطة مؤلف هــذا الكتاب، وذلك عن طريق الحث الميكانيكــي لتفاعل الحالة الصلبة Mechanically-Induced Solid-State Reaction بــين مســاحيق حبيبــات الكربــون والتيتانيوم، باســتخدام طاحونة الكرات عالية القدرة. ومن الشــكل نســتطيع القول إن طريقة التحضير هذه توفر إنتاج حبيبات نانوية فائقة النعومة. تصل أقطارها إلى نحو 5 نانومترات [14].

- **تحضير مساحيق المواد المطيلة نانوية الحبيبات**

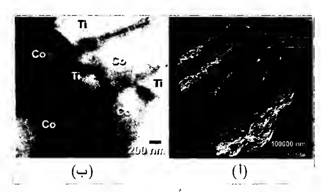
يُقصــد بالمواد المطيلة هنا، تلك المُواد التي تتمتع بالقدرة على التشــكل، المتمثل في تغير أبعادها وأشكال هياكلها الخارجية عند تعرضها للإجهادات الخارجيــة الواقعــة عليها. وتضم فئة المــواد المُطيلة جميــع عناصر المواد

الفلزية، مثل النُحاس، والألومونيوم، والحديد، وغيرها من الفلزات والسبائك الفلزية، مثل سبائك الحديد، وسبائك الذهب، وسبائك التيتانيوم. والتشكل الذي تبديــه حبيبات المواد المُطيلة يُعبر عن مقاومتها للحمل المؤثر فيها من دون أن تنهــار وتفصل حبيباتها، كما هي الحال في المواد القصفة. ومن ثم، فإن تصغيــر حبيبات تلك المواد عن طريق تعريضها للإجهادات المتولدة من الكــرات المتصادمة داخل طواحين الكرات يخضع لميكانيكية خاصة، تختلف عــن تلك الموضحة في المواد القصفة، وذلك نظرا إلى اختلاف نوع الرابطة الكيميائية، واختلاف الترتيب الذري بين المادتين؛ القصفة والمطيلة. ويجري تصغير حبيبات المواد المطيلة على عدة مراحل كما يلي:

- **المرحلة الأولى**: عند تعريض جسيمات المواد المطيلة إلى قوى الضغط والصدم الناشــئة داخل طواحين الكرات، فإن جســيمات تلك المواد تبدأ في التفلطح والاســتطالة وتقل ثخانتها (ســمكها)، ممــا ينجم عنه تغير بأحجامها. ونظرا إلى قابلية تلك المواد على التشــكل، فإن مساحيقها في هــذه المرحلة المُبكرة من مراحل الطحن الميكانيكي تبدأ في التجمع بعضها مــع بعض على صورة تكتل حبيبي كــروي، مكونة في هذا التجمع حبيبات كبيرة الأحجام تصل أبعاد أقطارها إلى مئات الآلاف من النانومترات، كما هو موضح في الشكل (6 - 4 «أ») الذي يعرض صورة مجهريه لعينة فلزية من مســحوق سبيكة النيوبيوم Nb بعد طحنها ميكانيكيا بواسطة طاحونة كور عالية القدرة لمدة ست ساعات [15]. هذا ويعرض الشكل (6 - 4 «ب») الهيئــة الداخلية للب حبيبة واحدة من حبيبات ســبيكة الكوبالت تيتانيوم $Co_{75}Ti_{25}$، بعد طحنها مدة نصف ساعة [16]. ويتضح من الشكل الأخير، النزعة التي تبديها الحبيبات الفلزية للتجمع والالتصاق بعضها ببعض عند تعرض مسحوق المادة إلى إجهادات تقع عليها في أثناء عملية الطحن.

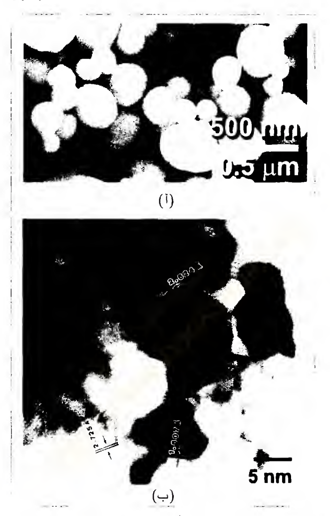
- **المرحلة الثانية**: بعد نمو أقطار حبيبات المادة وزيادة أحجامها خلال الدقائق الزمنية الأولى لعملية الطحن، تبدأ كتل الحبيبات المتجمعة في امتصاص مزيد من الإجهادات المتولدة عن عملية الطحن، مما يســفر عن وقوع تشــوهات لدنة Plastic Deformations بالشــبكة البلورية (الشــكل 6 - 5 «أ»)، وهي تشوهات دائمة لا تزول بزوال الإجهاد المؤثر. ومع زيادة الفترة الزمنية للطحن، تتزايد كثافة قــوى القص المؤثرة في حبيبات المادة، الأمر الذي تنجم عنه تشــوهات ضخمة بالشبكة البلورية للمادة، وانزلاقات شديدة بأعمدة وصفوف تلك الشبكة.

- **المرحلة الثالثة**: ومع زيادة الفترة الزمنية للطحن الميكانيكي، تتزايد كثافة تلك التشـوهات المتراكمة بالشبكة، مما يؤدي إلى ضعف في مقاومة المادة لها، فتقل قدرتها على اسـتيعاب المزيد من الإجهادات المؤثرة، وينتهي الأمر إلى أن تخضع الحبيبات وتجنح في أن تنخلع على امتداد حدودها البينة، الفاصلة بينها وبين الحبيبات المتاخمة الأخرى، مكونة بذلك حبيبات أصغر حجما.



الشكل (6 - 4): (أ) صور مجهرية أُخذت بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني لعينة من سبيكة $Nb_{50}Zr_{10}Al_{10}Ni_{10}Cu_{20}$ الفلزية بعد طحنها لمدة ست ساعات، توضح المظهر الخارجي لحبيبات السبيكة التي تكتلت بعضها مع بعض. لتؤلف حبيبة ضخمة، يصل مقياس بعدها القطري إلى أكثر من مليون نانومتر [15]. ويوضح الشكل (ب) صورة مجهرية أُخذت بواسطة الميكروسكوب النافذ الإلكتروني، تبين تكتل حبيبات عنصري التيتانيوم Ti والكوبالت Co بعضها مع بعض لتكوين بنية اللب الداخلي لحبيبة واحدة من حبيبات سبيكة $Co_{75}Ti_{25}$، طُحنت لمدة 12 ساعة [16].

- **المرحلة الرابعة**: ومع زيادة الفترة الزمنية التي تتعرض فيها مساحيق حبيبات المادة للطحن الميكانيكي المتواصل وازدياد الإجهادات الواقعة على الأسطح الخارجية للحبيبات، يزداد تفتت المساحيق لتصل أبعاد أقطارها الظاهرية إلى أقل من 400 نانومتر، كما هو مبين في الشكل (6 - 5 «أ») الذي يعرض صورة مجهرية أُخذت بالميكروسكوب الماسح الإلكتروني لمسحوق عينة من عينات سبيكة التيتانيوم بعد طحنها مدة 200 سـاعة. هذا في الوقت الذي تتزايد فيه أيضا الانهيارات داخل الشبكة البلورية للمادة، مما يؤدي إلى مزيد من تفتت الحبيبات وانفصالها بعضها عن بعض، لتتكون بذلك حبيبات نانوية فائقة النعومة، تقل مقاييس أبعاد أقطارها عن 5 نانومترات (الشكل 6 - 5 «ب») [17].



(أ)

(ب)

الشـكل (5 - 6): (أ) صور مجهرية أخذت بواسـطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني لعينة من حبيبات إحدى سبائك التيتانيوم الفلزية $Ti_{60}Al_{15}Ni_{10}Cu_{10}Zr_{10}W_{10}$ حصـل عليهـا بعد 200 سـاعة من الطحـن، باسـتخدام طاحونة كرات عاليـة القدرة. والصـورة توضح المظهر الخارجي لحبيبات السـبيكة، التي تقـل مقاييس أبعاد أقطارها الظاهرية عن 500 نانومتر.

ويصور الشـكل (ب) صورة مجهرية للبنية الداخلية لحبيبة من حبيبات السـبيكة، كما يصورها لنا الميكروسـكوب النافذ الإلكتروني، والتي توضح أنها تتألف من حبيبات فرعية دقيقة ذات أبعاد نانومترية، لا تتجاوز مقاييسها 5 نانومتر [17].

دمج مساحيق الحبيبات النانوية

تتمتع مساحيق حبيبات المنتج الناتج عن عملية الطحن الميكانيكي بعدة خواص مورفولوجية متميزة، تتمثل في نعومة أسطحه وفي كروية أشكال حبيباته، ودقة مقاييس أبعاد أقطار حبيباته ونعومتها الفائقة، وارتفاع نسبة قيمة مساحته السطحية مقارنة بحجمه. وتتمتع كذلك حبيبات المنتج النهائي بتجانس تركيبها البنائي والكيميائي.

وُتستخدم مساحيق الحبيبات النانوية بحالتها تلك وبالهيئة التي أُنتجت عليها ومن دون معالجة تُذكر، في كثير من التطبيقات التكنولوجية الهامة والرئيسية وتُعد عملية «رش ونفث» الحبيبات Spraying النانوية وترسيبها على سطح المشغولات والمنتجات في صورة طبقات Layers أحادية أو متعددة Multilayer، بهدف وقاية أسطح تلك المنتجات من التعرض للتآكل عن طريق الصدأ Corrosion أو التآكل Erosion، أو بهدف تحسين الخواص الميكانيكية لأسطح تلك المُعدات وإضافة خواص أخرى متميزة لها، من أهم العمليات التكنولوجية التي تجد لها تلك الحبيبات الناعمة استخدامات واسعة وعريضة.

ولعل مجال تغطية Coating الأسطح الخارجية للعدد والمعدات المستخدمة في عمليات استخراج المياه الجوفية من باطن الأرض، والبترول والغاز، وكذلك في تبطين الأسطح الداخلية والخارجية لأنابيب نقل السوائل والغازات بشكل عام، أهم وأبرز المجالات التطبيقية التي تُوظف بها مساحيق الحبيبات النانوية. هذا بالإضافة إلى أن تلك المساحيق تُستخدم في عمليات تغطية أسطح مُكونات الأجهزة المُستخدمة بعمليات تحلية المياه المالحة Desalinations، علاوة على توظيفها في تبطين الأسطح الداخلية من الوحدات المُستخدمة في عمليات تكرير زيت النفط Oil Refining.

وعلى الرغم من كل هذه الاستخدامات المتنوعة والمثيرة حقا لمساحيق الحبيبات النانوية الناتجة عن عملية الطحن الميكانيكي، فإن هناك العديد من المجالات الصناعية الأخرى تتطلب في تطبيقاتها وجود جسيمات صلبة عالية الكثافة تدخل كأجزاء Parts في مكونات Components المنتج النهائي Final Product. فمثلا، عمليات التشكيل التقليدية لسبائك المواد

بغرض تصنيع مكونات بعض الأجزاء الصغيرة جدا للماكينات والآلات، مثل التــروس Gears، عملية مُعقدة وصعبة وفي الوقت نفســه باهظة التكلفة، خصوصا إذا ما كانت الســبائك والمواد المُصنعــة منها تلك التروس تتمتع بصلادة عالية.

ومن ثم فإن عمليــة دمج الحبيبات وتجميعهــا Consolidation على صورة جســيمات صلبة، تمثل ضرورة قصوى ومســألة شديدة الأهمية. ومصطلح التجميع أو الدمج هذا يُستخدم للتعبير عن العملية التي تُجرى بواســطة «المكابس الهيدروليكية» Hydraulic Presses للمساحيق بهدف دمجها معا وتشــكيلها على هيئة جسيمات هندســية منتظمة متماسكة، تلائم الغرض أو التطبيق الصناعي الذي صُنعت من أجله. ويُمكن تلخيص عملية كبس وتجميع المساحيق والحبيبات في عدة نقاط هي:

- يوضع مسحوق الحبيبات داخل قوالب Molds، تُصنع من مواد فائقة الصــلادة، عالية المقاومة والتحمل Hard and Tough Materials، تعد من ســبائك صلب العدد أو المواد السيراميكية. ويُصنع القالب المستخدم على الشكل الذي يُراد أن تُنتج عليه المساحيق، فيمكن أن تكون على هيئة تروس أو مكعبات أو أي أشــكال أخرى مهما بلغــت صعوبتها وتفاصيل تركيبها. ويعــرض الشــكل (6 - 6) نموذجا لإحدى هذه القوالــب التي قام المؤلف بتصميمها واستخدامها في كبس وتجميع المساحيق النانوية لعدد من المواد المختلفة. وتظهر في الشــكل أيضا أداة الكبس المُستخدمة والمعروفة باسم «الغَطاس» Plunger.

- بمجرد شــحن قالب الكبس بمســاحيق الحبيبــات، يُدخَل الغَطاس تدريجيا إلــى تجويف القالب، وذلك بواســطة تطبيــق الأحمال، تختلف قيمتها باختلاف مادة المساحيق المُراد كبسها وتجميع حبيباتها،

- للحصول على مُنتج نهائي صلب يتمتع بكثافة عالية، يُعاد تطبيق حمل الكبس Pressing Load مرات عديدة، قد تصل إلى عشرات المرات.

- بعد الانتهاء من الخطوة الســابقة، يُترك الحمــل على العينة لفترة زمنيــة تختلف مدتها باختلاف المادة المُراد دمج حبيباتها. وبعد ذلك يُخرَج المُنتج النهائي الذي يكون صلبا ومتماسكا.



الشكل (6 - 6): صورة توضح الشكل الخارجي لقالب الكبس والغطاس، المستخدمين في عملية كبس وتجميع مساحيق الحبيبات النانوية فائقة النعومة [18].

هذا وتصنَّف عملية الكبس إلى نوعين هما:

– الكبس على البارد Cold Pressing، والتي يتم فيها كبس الحبيبات عند درجة حرارة الغرفة.

– الكبس على الساخن Hot Pressing، والتي يتم فيها كبس الحبيبات عند درجات حرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة، لكن لا تزيد قيمها على نسبة 75% من نقطة انصهار المادة المُراد كبسها.

وقد انبثقت عن النوعين السابقين طرق أخرى متقدمة، من أهمها طريقة التلبيد المُنشط باستخدام البلازما Plasma Activated Sintering [19]، التي تتميز بسرعة إتمام عملية الكبس في زمن قياسي قصير لا تتجاوز مدته خمس دقائق [20].

وعلى الرغم من تمتع مساحيق الحبيبات النانوية بالكثير من الخواص المورفولوجية المتميزة والتي تؤهلها لأن تُدمَج لتصنيع الأشكال الصعبة بالغة التعقيد، بيد أن عملية كبس الحبيبات النانوية وتحويلها إلى أجسام صلبة متماسكة، تُمثل تحديا كبيرا من التحديات التي تواجهها المواد النانوية وتطبيقاتها

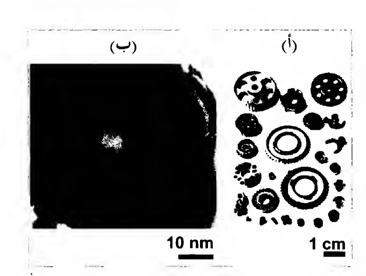
الصناعية. وهذه الصعوبة تتمثل في عدم تمتع مساحيق الحبيبات النانوية بشكل عام بثبات حراري Thermal Stability مرتفع، وهذا يؤدي إلى تضخم ونمو في مقاييس أبعاد حبيباتها النانوية التي تتميز بها، وذلك عند محاولة كبسها ودمج حبيباتهـا عند درجات الحرارة العالية. ونمـو الحبيبات Grain Growth يُمثل خطـورة على الخواص الفريدة لمواد النانو، حيث إنه يُعيد هذه الخواص إلى ما كانت عليه قبل عمليات التحضير، ومن ثم فهو يُفقدها خواصها المتميزة التي كانـت تتمتع بها المادة قبل خضوعها لهـذا النمو في الحبيبات. وإذا كان الأمر هكـذا، فلماذا لا تتـم عملية كبس ودمج الحبيبات عند درجـة حرارة الغرفة، باستخدام طريقة الكبس على البارد؟ في الواقع، أن طريقة الكبس على البارد لا تتناسب مع المواصفات المطلوب توافرها في المنتج النهائي لعملية الكبس، حيث إن مسـاحيق الحبيبات النانوية بما لها من مسـاحة أسطح ضخمة بالإضافة إلى تمتعهـا بمقاييس متناهية في الصغر، تُبدي مقاومة كبيرة لأحمال الكبس المُطبقة عليها، وهذا يؤدي إلى ضعف في صلابة وتماسـك المنتج النهائي بعد عملية الكبس كنتيجة طبيعية لانخفاض قيمة كثافته.

ويتمثـل التحدي في الرغبـة في الحصول على صفتـين متناقضتين يجب توافرهما معا بالمنتج النهائي بعد عملية الكبس، وهما: شرط ارتفاع كثافته لتكون أكبر من 99.5%، والشـرط الثاني هو تمتع البنية الداخلية للمنتـج النهائي بهوية حبيباتها النانوية متناهية الصغر. وهذا يعني حتمية استخدام طريقة الكبس على الساخن مع تلاشي أي نمو في الحبيبات، أو على الأقل عدم زيادة قيمة مقدار هذا النمو على حد معين.

وقد شـارك المؤلف وفريق عمله في الأنشطة البحثية والتطبيقية المعنية بتصميـم مكابس خاصة تلائم مسـاحيق حبيبات المـواد منخفضة الاتزان والثبات الحراري، ومن بينها المواد النانوية [19]. وهذا الاهتمام البحثي ينال الآن المزيد من الاهتمام من قبل العلماء والباحثين في مجال علوم وتكنولوجيا النانو بأرجـاء العالم. وقد قادت تلك الاهتمامات البحثية في هذا المضمار إلى كبس ودمج مسـاحيق الحبيبـات عند درجات حرارة عالية وخلال فترة زمنية قصيرة، يتم بعدها تبريد المنتج تبريدا سريعا من خلال تعريضه لتيار متدفق ومسـتمر من غاز الأرغون البارد، مما أدى إلى تجنب النمو والزيادة في مقاييس الحبيبات [21،20]. كما كُللت تلك المجهودات البحثية المستفيضة

والمســتمرة طوال عشر سنوات بالنجاح في الحصول على منتجات هندسية متميــزة تتمتع بهويتها النانوية من حيث مقاييــس أبعاد حبيباتها الداخلية، وفي الوقت نفسه فهي تتميز بكثافتها العالية (22،23). هذا التحدي والتمتع بصعابه ومُخرجاته الواعدة، يتم من خلال هذه المكابس الخاصة.

ويبين الشكل (6 - 7 «أ») صورة فوتوغرافية لمجموعة من التروس مختلفة الأشــكال والمقاييس تم تحضيرها من قبل مؤلف الكتــاب عن طريق الكبس الخاص الساخن لمساحيق حبيبات كربيد التيتانيوم. وبفحص التركيب الداخلي لحبيبات هذه التــروس، قد اتضح أنها تتمتع بمقاييس نانوية الأبعاد وبكثافة عالية، كما هو موضح بالشكل (6 - 7 «ب») الذي يعرض صورة مجهرية للُب العينة الداخلي، أخذت بواسطة الميكروسكوب النافذ الإلكتروني (14).



الشـكل (6 - 7): (أ) صـورة فوتوغرافيـة تبين نمـاذج التروس والقطع الهندسـية المختلفة المستخدمة في تشغيل بعض الماكينات والآلات، التي أنتجت عن طريق كبس ودمج مساحيق الحبيبات النانوية لكربيد التيتانيوم، السابق تحضيره بواسطة الطحن الميكانيكي. وتوضح الصورة (ب) صورة مجهرية أخذت بواسـطة الميكروسـكوب النافذ الإلكتروني للب عينة من التروس المنتجة، توضح احتفاظ الحبيبات بعد عملية الكبس بهويتها النانوية، حيث تبلغ متوسـط مقاييـس أبعاد أقطار تلك الحبيبات نحـو 35 نانومتر. وتبين الصورة (ب) أيضا، مدى تماسـك الحبيبـات المكونة للهيكل الداخلي للترس المنتـج وغياب أي فجوات في هذا التركيب، مما يعني ارتفاعا في قيمة الكثافة النوعية للترس (14).

• **تقنية الطباعة على الأسطح**

بعد أن ناقشنا كيفية إنتاج مساحيق المواد النانوية وحبيباتها بتقنية الطحن الميكانيكي التي تعقبها عمليات الكبس والدمج للحصول على مواد كتلية تتمتع بتركيب داخلي مؤلف من حبيبات نانوية Bulk Nanostructured Materials، أقترح أن ننتقل لنستعرض تقنية أخرى مختلفة، لكنها تقع تحت نفس الأسلوب الخاص بإنتاج المواد النانوية من الأعلى إلى الأسفل. ويُطلق على هذه التقنية اسم «طريقة الطباعة النانوية على الأسطح (الليثوغرافي) Nanolithography. وأصل الكلمة هو Lithography، وترجمتها هي «الطباعة الحجرية» أي نحت ورسم صور الأشياء Images على الأحجار Stones وأوراق النباتات، مثل أوراق نبات البردي Papyrus ثم القيام بتلوينها باستخدام المواد المُلونة. وأود هنا أن أذكر القارئ الكريم بأنه منذ ابتكار أسلوب الطباعة، فإن استخدام مصطلح الطباعة الحجرية يرمز إلى الطباعة على الأسطح الخارجية للأشياء كأسطح الأوراق باستخدام تقنيات الطباعة المتنوعة، مثل تقنية الحبر النافث Inkjet Technique. ومن الجدير بالذكر، أن البنية الهيكلية لرقائق Chip Structure أجهزة الحاسبات الإلكترونية يتم إنتاجها بالفكرة نفسها، ولكن عن طريق استخدام طريقة الطباعة الحجرية الضوئية Optical Lithography أو الطباعة الحجرية بالأشعة السينية X-ray Lithography.

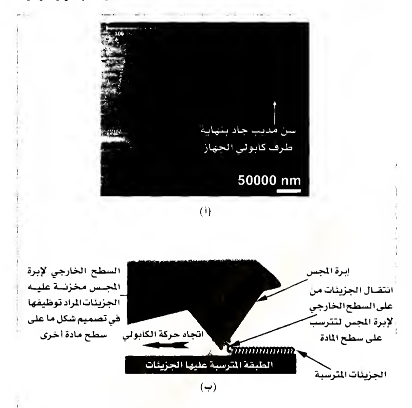
وبعيدا عن الطرق الموظفة في الطباعة الورقية والطباعة على أسطح الأكواب والأقمشة وغيرها وبكل ما لها من منتجات حديثة ومهمة، هناك طرق تم ابتكارها لنقل جزيئات أو ذرات مادة ما كي تترسب على سطح مادة أخرى، وذلك بواسطة تقنيات تكنولوجيا النانو. وتتضمن تلك التقنيات عدة طرق وتقنيات أخرى فرعية مثل طريقة الشعاع الإلكتروني للطباعة النانوية Electron Beam Nanolithography وغيرها، بيد أن تقنية الطباعة النانوية بواسطة القلم المغموس Dip Pen Nanolithography هي أوسع الطرق انتشارا وأقلها تكلفة، لذا فقد رأيت أن أقدمها إلى القارئ الكريم وأشرح فكرتها وخطواتها، ولكن في إيجاز شديد.

• تقنية الطباعة النانوية بواسطة القلم المغموس

تقنيـــة القلم المغموس Dip Pen تقنية معروفة فـــي الطباعة التقليدية، يتم من خلالها تصميم أي شـــكل يراد نقشه على أي سطح، تماما مثلما نفعل عند اســـتخدامنا أقلام الحبر لرسم خطوط من الحبر على سطح الأوراق. لكن، ما الجديد في هذا الأمر؛ ولماذا سُميت هذه التقنية بالطباعة النانوية بالقلم المغموس Dip Pen Nanolithography (DPN)؟ الجديــد هــو أن تكنولوجيا النانو، عن طريق استخدامها إحدى أدواتها الرئيسية المهمة، وهي ميكروسكوب القوة الذرية Atomic Force Microscope (AFM)، اســتطاعت أن توظـف «الطرف الحاد الموجود في الطرف الســفلي لذراع - يطلق عليه اسم الكابولي Cantilever - الميكروسكوب، الذي يُعرف باسم إبرة المَجَس Tip Probe، لتنفيذ أعمال عمليات الطباعة النانوية متناهية الدقة على الســطح الخارجــي لمادة ما. وبالنظر إلى الشكل (6 - 8 «أ») [24]، الذي يعرض صورة مجهرية لإبرة المَجَس [25]، يتضح لنا أن مقاييس أبعــاد رأس هذه الإبرة لا تتعدى في ثخانتها 60 نانومتر. وهذه الأبعاد النانوية الدقيقة تُتيح لإبرة المجس القدرة على التعامل مع ذرات وجزيئات المادة والتلاعب بها، مستخدمة إياها في تنفيذ وتشكيل أعقد الأشكال النانوية وأكثرها دقة وصعوبة، وذلك بترسيبها على سطح أي مادة أخرى.

ويبــين الشــكل (6 - 8 «ب») ميكانيكيــة العمل بهــذه الطريقة، التي تتم من خلال اتخاذ الســطح الخارجي لإبرة المَجَس «كخرطوشــة الحبر» لتخزيــن ذرات أو جزيئات المادة المراد ترســيبها على ســطح مادة أخرى. وتقوم هذه الجزيئات بمهام «مــادة الحبر» في الطابعات، حيث تندفع من أماكنها بالســطح الخارجي للإبرة واحدة تلو الأخرى في عكس اتجاه ذراع الميكروسكوب (الكابولي) عند تحركه في اتجاه الرسم المُراد.

وبوجه عام، فإن تقنية الطباعة النانوية هي أدق الطرق وأكثرها انتشــارا وكفاءة في تصنيع المكونات الإلكترونية الدقيقة متناهية الصغر ذات الأشكال شديدة التعقيد، مثل الرقائق المُستخدمة صناعة الشرائح الإلكترونية، وكذلك فــي تصنيع أعقد أنواع النظم الكهربائية والميكانيكية، وذلك على المســتويين الميكرومتــري Microelectro Mechanical Systems (MEMS) والنانومتري Nanoelectro Mechanical Systems (NEMS).



الشكل (6 8): (أ) صور مجهرية بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني توضح شكل إبرة المَجس الخاصة بميكروسكوب القوة الذرية (24). (ب) ميكانيكية عمل الطباعة النانوية في ترسيب الذرات أو الجزيئات على الطبقة الخارجية لسطح مادة ما بالشكل والتصميم المطلوبين [8].

• نمط إنتاج المواد النانوية بأسلوب من الأسفل إلى الأعلى

ننتقل في هذا الجزء لنستعرض بإيجاز الأسلوب الثاني والأخير في إنتاج المواد النانوية، وهو النمط المعروف باسم «الأسفل إلى الأعلى». وتعتمد فلسفة هذا النمط على تصميم Design الجهاز أو المُعدة النانوية المراد إنتاجها، ثم القيام بتفصيل (حياكة) Tailoring

مكونات نسـيج هيكلها الداخلـي المكون من الـذرات أو الجزيئات، بحيث يتم ترتيب وتشكيل هذه المُكونات، ذرة - ذرة، وجزيئا - جزيئا، ووضعها في هياكل نانوية محددة الأبعاد والأشكال، وفقا للبنية المراد الحصول عليها.

ويهدف هـذا النمط الإنتاجي إلى الحصول علـى هياكل نانوية تتمتع بخواص وسمات غير متوافرة في المواد التقليدية الأخرى التي لها التركيب الكيميائي نفسه، الأمر الذي يعني إضافة وظائف جديدة متميزة وقدرات هائلـة لهذه الهيـاكل عند دخولها كعناصر ومكونات أساسـية في تصنيع الأجهزة النانوية المختلفة.

وفي إطار هـذا الهدف، فإن نمط إنتاج المـواد والأجهزة النانوية من خلال أسـلوب «الأسـفل إلى الأعلى» يتطلب توافر ثلاثة عناصر رئيسية هي:

- جزيئات المادة، والتـي يُطلق عليها «لبنات البنية الجزيئية» (MBBs Molecular Building Blocks، تكون لهذه الجزيئات المُخلقة القدرة على الارتباط مع غيرها من جزيئات المواد الأخرى لتكوين تراكمات من الجزيئات يتم ترتيبها لتحتل أماكنها بالهياكل النانوية وفقا للنموذج المُصمم.

- توافـر طـرق ملائمة ودقيقة، نسـتطيع من خلالها اسـتخدام تلك اللبنات الجزيئية في بناء الهياكل النانوية المراد تخليقها.

- القدرة على توظيف تلك الهياكل النانوية المُخلقة في تصنيع الأجهزة الدقيقـة صغيرة الأحجـام، والتي قد تصـل مقاييس أبعادهـا إلى عدة ميكرومترات أو بعض ملليمترات.

وأود أن أشـير هنا إلى أن هـذا النمط الإنتاجي القائم على تجميع جزيئات بعينها واستخدامها كلَبنات للبناء الجزيئي نانوي الأبعاد، المكون لهياكل المـواد والأجهزة النانوية، يُعرف باسـم تقنية التجميع الجزيئي Molecular Assembly. وتنقسم هذه التقنية إلى نوعين هما:

- التجميـع الموضعي Positional Assembly، والتي يُطلق عليها أيضا مُسمى التجميع الآلي أو الروبوتي Robotic Assembly.

- التجميع الذاتي Self-assembly.

التجميع الموضعي

تشـير تقنية التجميـع الموضعـي Positional Assembly (تُعرف أيضا باسـم التجميع الآلي أو الروبوتي Robotic Assembly) إلى تلك الأساليب المُستخدمة للتحكم في البناء الذري للمادة من خلال التلاعب في طريقة ترتيب الذرات والجزيئات ومواضعها في الهيكل الداخلي للمادة. وتتيح تلك التقنيات للمستخدم أو الحرفي المتخصص في إعادة صياغة البناء الذري للمادة، رؤية ومراقبة عمليات إعادة الهيكلة الذرية أو الجزيئية خطوة بخطوة، والتحكم في مجرياتها، وذلك على مستوى النانومتر الواحد، ووفقا لنموذج التصميم الذري الهيكلي المُراد الوصول إليه. ويجري الآن تطوير تلك التقنية ورفع قدرتها ودقتها في بناء أجهزة وآلات دقيقة وصغيرة للغاية.

منذ أن بدأت البشرية رحلتها مع تكنولوجيا النانو بالعقود الثلاثة الأخيرة من القرن الماضي، داعب خيال العلماء والباحثين وهيمنت عليه فكرة التلاعب الفـردي بذرات وجزيئات المادة وترتيبها على هيئة نماذج وأشكال لتكوين البنية الداخليـة Internal Structure لهياكل الأجهـزة المُراد إنتاجها، مهما بلغـت أحجامها وكبرت مقاييس أبعادها أو صَغُـرت. وإن جاز التعبير، فقد كانـت هذه الفكرة بمنزلة الوحي الـذي تمخض عنه فكرة التصنيع الجزيئي Molecular Manufacturing، ويعود الفضل في ترسيخ مفاهيم وأسس ذلك الأسـلوب النانوي من التصنيع الجزيئي، إلى العالم الشـهير ايرك دريكسلر Eric Drexler، وذلك في العام 1981[26].

ولا أدري، فيبـدو لي - ولعلني أكون مخطئا في هذا الاسـتنتاج - أنه قد سـاء لبعض من علماء الكيمياء في تلك المرحلة المبكرة لتكنولوجيا النانو، أن يروا أشـقاءهم الفيزيائيين وأولاد عمومتهم من علماء الهندسة وهم يقودون العالم نحـو ثورة حقيقية مؤكدة. كان هذا مُلاحظـا وجليا لنا عند حضورنا لجلسات أعمال المؤتمرات العلمية، الدولية منها وحتى المحلية، وذلك في فترة الثمانينيات من القرن الماضي. واسـتفحل هذا الأمر وتعمق حين أخذ البعض منهم يتهكم تارة من الفكرة التي تقوم عليها تقنية التصنيع الجزيئي، ويسخر تارة أخرى من أسلوب تنفيذها العقيم البالغ التكلفة، ناسبين لأنفسهم السبق والفضل الأبدي الدائم منذ القدم، في التعامل مع ذرات المواد المختلفة لإنتاج جزيئات المئات بل الآلاف من المنتجات والمركبات الكيميائية المتنوعة.

وقد تجاوز الوسط العلمي العالمي الآن، ومنذ فترة، تلك المرحلة من النقاش العلمي الحاد، الذي وصل في كثير من الأحيان إلى حد «التراشق العلمي» بين علماء الكيمياء والأحياء من جهة، وبين علماء الفيزياء والهندسة من جهة أخرى. ومع النمو المتزايد لمنتجات تكنولوجيا النانو، ودخولها إلى ميادين التطبيقات الفعلية منذ نهاية القرن الماضي، هدأ النقاش بين الجبهتين حول «قضية النسب» هذه، وبدأ علماء الكيمياء والأحياء في التعاون المثمر البناء مع أشقائهم من علماء الفيزياء والهندسة، الأمر الذي يقود العالم إلى تحقيق إنجازات أسرع في مجال تطبيقات تكنولوجيا النانو. ومن الطريف أن هذا الجدل يبدو وكأنه قد صُدرَ من دول الريادة في عالم النانو، إلى الأوساط العلمية ببلدان العالم النامي، والتي دخلت حلبة «البحث العلمي النانوي» في السنوات الأخيرة الماضية. بيد أن هذا الجدل، حتى في بلدان عالمنا النامي قد بدأ في الانحسار تدريجيا. وعلى المستوى الشخصي، أعتقد أن الكثيرين يشاركوني في هذا الرأي، فأنا من المؤمنين بأن علم وتكنولوجيا النانو أصبحا ملكا للجميع، فقد فتحت تكنولوجيا النانو الباب لنا، بتخصصاتنا المختلفة، للشراكة في البحث العلمي، انطلاقا من أن لكل دوره، صغُرَ هذا الدور أو تعاظم وكبر، وأن لكل منا تخصصا دقيقا، ولا يوجد تخصص مهم وآخر غير مهم، فجميع التخصصات لها القدر نفسه من الأهمية. ولكن علينا كعاملين في مجال البحث العلمي أن نحترم ونُقدر تخصصات الآخرين، قدر احترامنا وتقديرنا لتخصصاتنا. وأرى كذلك، أن نُحب العلم لذاته وأن نربأ بأنفسنا عن توظيفه لتحقيق أي مصالح شخصية أو فردية.

وأود هنا أن أوضح للقارئ الكريم الأسباب التي أدت إلى نشوب الخلاف بين العلماء المُنتمين إلى أفرع العلوم الأساسية من الفيزياء والكيمياء والأحياء حول جدوى تكنولوجيا النانو وأحقيتها في أن توصف على أنها ثورة تكنولوجيا حديثة. لعلنا نتفق في البداية بأن مسألة تجميع ذرات المادة وجزيئاتها لتشكيل مُنتج ما، بغض النظر عن حجمه أو مقاييس أبعاده، هي وسيلة معروفة تقوم عليها كل طرق التصنيع، الحديث منها والقديم. وذلك لأن المواد الأولية الداخلة في تصنيع أي مُنتج، هي في الأساس مؤلفة من مجموعة من الذرات أو الجزيئات، تجمعت وتفاعلت بعضها مع بعض لتعطي في النهاية

هيــكل المادة المطلوب الحصول عليه. بيـد أن كل هذه الطرق التقليدية، حتى الحديثة منها والمستخدمة في صناعة رقائق الأجهزة الإلكترونية على مستوى الإنتاج الصناعي، تعبر بشــكل صارخ عن عجزها في فرض هيمنتها الكاملة على الترتيب أو النســق الذري داخل هيكل المُنتــج - وفقا لطموحات العلماء والباحثين - وعدم قدرتهــا على تأهيل تلك الذرات لأن تحتل مواقع محددة، مرتبة ومنتظمة بداخل الهيكل الذري للمادة.

وكان للكيميائيين الســبق في توظيف ذرات أو جزيئات المواد المختلفة من أجــل تخليق Synthesis هيــاكل ذرية أو هياكل جزيئيــة مؤلفة من ذرات أو جزيئــات تلك المواد. تقوم الطرق الكيميائية بتخليق تلك الهياكل النانوية، عن طريق خلط Mixing المحاليل المختلفة المحتوية على ذرات أو جزيئات عناصر أو مركبات يُراد اســتخدامها كوحدات بناء الهياكل النانوية للمنتج. ويتيح هذا الخلــط الفرصة لتلك الذرات أو الجزيئات في التحرك داخل المزيج، وتطوف هائمة فيه باحثة عن جزيئات المادة الأخرى، عســى أن تصطدم بها فتتفاعل معهــا أو تصادقها فتلتصق بها مكونة في ذلك جزيئات مركب مادة جديدة له هياكل ذرية محددة.

ويرى الفيزيائيون وعلماء هندســة المواد، في أن الجزيئات الناتجة عن تلــك الطرق الكيميائيــة تحتل مواقعها في البنية النانوية للمادة الناشــئة بأســلوب عشــوائي Random Fashion تغلب علــيه الفوضى ويغيب عنه الترتيــب والنظام. ويرون كذلــك، أن طرق التصنيــع الجزيئي عن طريق التعامل المباشــر مع ذرات المادة أو جزيئات المركب، تُتيح لنا التحكم المُتقن في وضع Placing تلك الجزيئات بمواقع محددة ومُختارة بالهيكل النانوي للمادة، وذلك بواسطة سلسلة من الخطوات فائقة الدقة.

وأود أن أشــير هنــا إلى أن طريقــة التجميع الموضعي المســتخدمة في ترتيب الــذرات أو الجزيئات بهيكل المادة المراد الحصول علىها، يغيب عنها «شبح» وقوع تفاعلات أخرى غير مقصودة أو غير مرغوب فيها Undesired Reactions، كمــا يحدث في كثير مــن الأحيان عند مزج أو خلط مركبين أو أكثر بالطرق الكيميائيــة التقليدية. وتؤدي تلك التفاعلات غير المرغوب في حدوثها بطبيعة الحال إلى تكون جزيئات لمركبات غير مرغوبة، تخلق لأنفسها

مواقع بالهيكل الجزيئي للمنتج، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث خلل في خواص المُنتــج واضطراب في أدائه عند التطبيق. بيد أن التقدم المســتمر والتطوير في اســتخدام التقنيات والوســائل المتقدمة في عالم الكيمياء، قد أدى إلى انحســار تلك الســلبيات القائمة، وزيــادة في دقة الترتيــب الجزيئي داخل الهياكل النانوية، علاوة على سهولة الأسلوب وانخفاض تكلفته الإنتاجية.

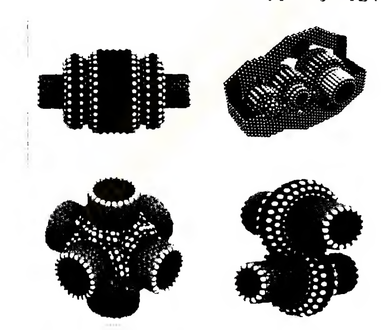
- **التصنيع الجزيئي**

ظلــت احتمالية الفشــل في تحويل فكرة تصميم وتصنيــع هياكل الأجهزة النانوية من مجرد حلم أو خيال إلى واقع وحقيقة، بمنزلة كابوس يقض مضاجع علماء الفيزياء ويؤرقهم، وذلك لأن الفشــل في تحقيق هذه الفكرة معناه عملية إجهاض مبكرة لكل ما يتعلق بعلم وتكنولوجيا النانو! هذا بالإضافة إلى أن هذا الفشل كان سيقود إلى حرمان البشرية من تلك الطائفة العريضة من المُنتجات النانوية المُبتكرة التي نستخدمها اليوم، الأمر الذي كان سيمثل لطمة قوية وخيبة أمل للقطاعات التطبيقية المختلفة، وعلى الأخص قطاع الطب والدواء.

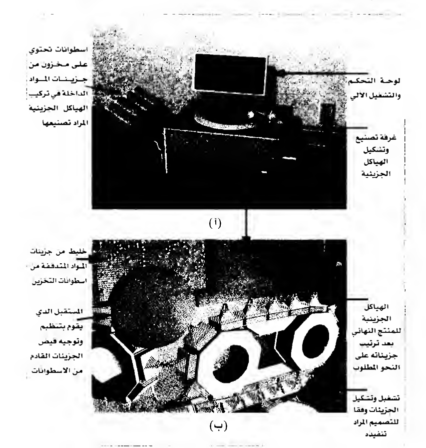
كما ذكرنا سلفا، فقد فاجأ «ايرك دريكسلر» مجتمع البحث العلمي باقتراح عبقري، تقدم به من خــلال عرض ورقة بحثية «تاريخية»، وذلك ضمن أعمال مؤتمر «أكاديمية العلوم الوطنية» بالولايات المُتحدة الأمريكية لعام 1981، وقد اقترح في هذه الورقة فكرة تقنية التصنيع الجزيئي لأي مُنتج، تلك الفكرة القائمة على فلســفة تكنولوجيا النانو في الإنتاج والتصنيع القائم على ذرات وجزيئات المــادة. وقد بين في بحثه هذا كيف أن «آلات تصنيــع الجزيئات» Molecular Machinery الموجودة في «النُظم الحية» Living Systems تثبت بوضوح جدوى القيام بمحاكاة تلك الماكينات عن طريق تقنيات «الهندســة الجزيئية المُتقدمة» Advanced Molecular Engineering التي تُمكننا من إنتاج ماكينات اصطناعية Artificial مشابهة، نستطيع بواسطتها تنفيذ أدق وأعقد التصميمات الجزيئية المرغوب في إنتاجها، وذلك بدقة النانومتر الواحد.

وقد أعطى دريكســلر في عرضه هذا تصميمــا لجزيئات البروتين المُخلــق، اعتبره الطريق إلى تصميم وتنفيذ جميــع التركيبات الجزيئية الاصطناعية لجميع المواد، بما فيهــا الخلايا الحية، والبداية الحقيقية

للتلاعب في ذرات وجزيئات المادة بهدف تشكيل هياكلها الذرية أو الجزيئية بدقة متناهية. وقد أثرى دريكسلر مجتمع البحث العلمي، بتصميمات هندسية لعديد من المُنتجات النانوية الدقيقة مثل التروس والجلب Bearings ووصلات التشغيل، قام بوضع تصميماتها باستخدام برامج المحاكاة الخاصة بتصميم الهياكل الذرية والجزيئية. ويعرض الشكل (6 - 9) بعض هذه النماذج، التي من المُعتقد إنتاجها بواسطة الهندسة الجزيئية خلال السنوات العشر المقبلة، أو قبل نهاية العام 2025 على أقصى تقدير. ويبين الشكل (6 - 10) رسما تخطيطيا افتراضيا لما سوف يكون عليه «المصنع الجزيئي» Molecular Factory، الذي هو عبارة عن ماكينة صغيرة يتم بداخلها تصنيع وتشكيل الهياكل الجزيئية المُراد تصنيعها.



الشكل (6 - 9): نماذج لتروس وجلب ووصلات تشغيل، تم وضع تصميماتها الافتراضية المبينة في الشكل بحيث تتألف مكونات هياكلها من مئات من جزيئات المواد المختلفة التي من المنتظر أن يتم ترتيبها على هذا النحو بواسطة آلات تصنيع الجزيئات المبينة في الشكل التالي [27].



الشكل (6 - 10): (أ) نموذج افتراضي لما سوف تكون عليه ماكينة تصنيع هياكل الجزيئات، التي تستقبل جزيئات المواد الأولية المكونة لهياكل المنتجات المراد تصنيعها، وذلك من خلال أسطوانات مشحونة بجزيئات تلك المواد. ويتم داخل هذه الماكينة تصنيع وتشكيل تلك الجزيئات وترتيب أماكن وجودها في الهياكل المراد إنتاجها، وذلك بواسطة برامج تشغيل آلية. ويبين الشكل (ب) مقطعا داخليا لماكينة تصنيع الجزيئات المبينة في (أ) حيث يتم داخلها ترتيب وتنظيم جزيئات المواد المندفعة من الأسطوانات، وذلك من خلال توظيف عدد من الأدوات النانوية الدقيقة. والشكل ككل يمثل الوضع الافتراضي الأكثر احتمالا لما سوف تكون عليه «مصانع النانو» الخاصة بتصنيع الهياكل الجزيئية القائمة على فكرة مؤسس هذا الاتجاه، البروفيسور إيرك دريكسلر [26] (قام مؤلف هذا الكتاب بإضافة الشرح على الشكل الأصلي الموجود بالمرجع رقم 26).

ويعتقد العلماء، أن التقدم المستمر في قدرة ودقة الأجهزة المُستخدمة على التلاعب بذرات وجزيئات المواد المختلفة، وإعادة ترتيب أوضاعها الداخلية وأماكن وجودها في شبكات الهياكل الداخلية للمادة، سوف يثمر مما لاشك فيه عن إعادة صياغة الترتيب الذري للمواد الصلبة، مما يعني القدرة على الحصول على صور عديدة من المادة الواحدة، تتباين في خواصها وسماتها، على الرغم من توحد صيغتها الكيميائية. ومن المأمول والمُنتظر أيضا، توظيف تقنيات إعادة الترتيب الذري والجزيئي للحصول على الماس Diamond وذلك بإعادة ترتيب ومواقع ذرات الكربون داخل شبكتها البلورية، لتكون على النهج الذي تسلكه ذرات الماس في بناء الشبكة. وسوف نتمكن كذلك من إنتاج شرائح أجهزة الحواسب الآلية عن طريق التلاعب بالبنية الداخلية لمادة السيليكا (المُكون الرئيسي لرمال الصحراء) والهيمنة على مكوناتها الداخلية، وذلك عن طريق إضافة نسب ضئيلة من ذرات عناصر أخرى من المواد.

ولم تمض سنوات كثيرة على مقترح التصنيع الجزيئي الذي تقدم به دريكسلر في العام 1981، حتى قام أربعة من العلماء المتخصصين في شركة IBM باحتضان هذا المقترح وابتكار نوع آخر من الميكروسكوبات يعُرف باسم الميكروسكوب النفقي الماسح Scanning Tunneling Microscope (STM) وينتمي هذا الميكروسكوب، الذي قد عرضنا رسما تخطيطيا له في الشكل «6 - 1»، لنفس عائلة ميكروسكوبات المسبار الماسح Scanning Probe Microscopes التي تضم ميكروسكوب القوة الذرية، الذي سبق أن تحدثنا عنه سلفا. وكما ذكرنا في الفصل الأول من الكتاب فقد نجح هؤلاء العلماء في توظيف الإبرة الدقيقة الموجودة بهذا الميكروسكوب النفقي الماسح (تُسمي المَجَس أو المسبار) من التقاط ذرات عنصر «الزينون» الخامل وتحريكها بدقة متناهية لإعادة ترتيبها واحدة تلو الأخرى على سطح بارد من فلز النيكل، لتشكل معا شعار الشركة مكتوبا بحروف قوامها ذري وأبعادها نانوية (الشكل 1 - 7).

وقد برهنت نتائج التجارب المُجراة، على قدرة هذا الميكروسكوب في أن يقوم بدور بارز في تجميع عدد ضخم من الذرات الخاصة بمواد مختلفة، لها خواص متباينة، وذلك في إطار بنية نانوية Nanostructured لهيكل ذري واحد. وأود هنا أن أوضح أن هذا البناء الهيكلي الذري المؤلف من عدد ضخم من ذرات المواد المختلفة يؤدي إلى تكوين هياكل ذرية تتمتع بخواص فريدة، حيث تجتمع فيها العديد من الخواص المتناقضة التي يستحيل تجمعها في هيكل ذري واحد. فعلى سبيل المثال، يعرف عن عنصر النحاس قدرته الفائقة على التوصيل الكهربي والحراري، ولكنه لا يتمتع بصلادة كافية تؤهله لكي يتم استخدامه منفردا بالتطبيقات التي تتعرض فيها أسطح قطع التشغيل لعوامل تؤثر في استقرار السطح وعدم خضوعة للتشكل والتشوه في أثناء التشغيل. لكن ماذا لو أضفنا نسبة معينة من ذرات فلز الحديد، المعروف بضراوته في التصدي للإجهادات الخارجية والذي يتمتع في الوقت ذاته بخواص جيدة في توصيله للحراة والكهرباء، إلى الهيكل الذري المؤلف من ذرات عنصر النحاس؟ ألن يوفر هذا في تقديم هياكل ذرية لمواد نانوية جديدة تتمتع بخواص التوصيل المتميز وكذلك تتحلى بمقاومتها الفائقة للإجهادات والصمود أمامها؟ هذا بالفعل هو ما قام به فريق آخر من العلماء في العام 1993(28، 29)، حين تلاعبوا بذرات العنصرين بواسطة جهاز الميكروسكوب النفقي الماسح، ليقدموا بذلك منظومة ذرية فريدة مؤلفة من ذرات عنصري النحاس والحديد (الشكل 6 - 11) تتمتع بخواص فيزيائية وميكانيكية غير مسبوقة.

ومن ذلك الحين، انضم هذا الميكروسكوب إلى تلك الأدوات المهمة التي نطلق عليها اسم المُجمعات (يُقصد هنا مُجمعات الذرات أو الجزيئات) Assemblers. وعلى الرغم من التقدم المستمر منذ ذلك التاريخ إلى يومنا هذا، بيد أن الطريق ما زال طويلا أمام التطبيقات الصناعية الفعلية لتلك التقنيات المُتقدمة في إنتاج مواد نانوية بهذه الكيفية. هذا على الرغم مما يشاهده قطاع الصناعات الإلكترونية من طفرة حقيقية في تجميع الشرائح الخاصة بالأجهزة الإلكترونية عن طريق بعض من تلك التقنيات.



الشكل (6 - 11): صورة مأخوذة بواسطة الميكروسكوب النفقي الماسح لمتراكبة هيكل ذري مؤلفة من ذرات عنصر النحاس المغطاة بطبقات نانوية مكونة من ذرات عنصر الحديد [28] أضاف مؤلف هذا الكتاب الشرح على الشكل الأصلي الموجود بالمرجع الرقم 28.

● **مزايا وعيوب تقنيات ميكروسكوبات المسبار الماسح في عملية التجميع الموضعي**

أود في هذا الجزء أن أضع بين يدي القارئ الكريم مقارنة أعددتها لبيان مزايا وعيوب استخدام تقنيات ميكروسكوبات المسبار الماسح بنوعيه في عملية التجميع الذاتي للذرات أو الجزيئات وتكوين الهياكل الذرية أو الجزيئية للمُنتج.

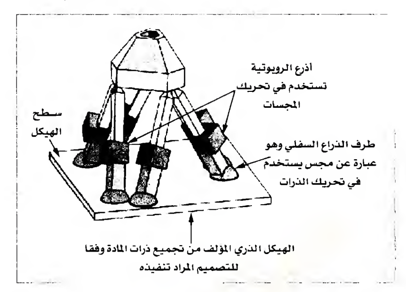
○ **المزايا**

- القدرة على التعامل مع الذرات أو الجزيئات الفردية، وتحريكها من مكان إلى آخر وترتيب أماكن وجودها وفقا للتصميم الموضوع.
- القدرة الفائقة على بناء هياكل ذرية لأشكال هندسية منتظمة ودقيقة على هيئة دوائر نانوية الأبعاد، لا تزيد أبعاد أقطارها على قطر الذرة الواحدة.

○ العيوب

- العيب الوحيد الذي يمكن أن يصم - إن جاز التعبير - هذه الطريقة بوضعها الحالي، هو أن تجميع الذرات والجزيئات لتشكيل الهياكل المطلوبة، بطيء جدا، مما يحد من استخداماتها على مستوى الإنتاج الصناعي. وهذا لا يمنع بالتأكيد من استخدامها في تصنيع الهياكل الجزيئية لبعض الأجهزة الدقيقة التي لا يتم إنتاجها بكميات ضخمة.

وفي رأيي الشخصي المتواضع، فنحن لا نزال نحتاج إلى مزيد من الجهد والعمل المتحليين بالصبر لإنتاج أجهزة تجميع للذرات والجزيئات ذات قدرة إنتاجية عالية، بحيث تحتوي على أذرع روبوتية Robotic Arms عديدة، تشبه تلك الأذرع الموجودة في ميكروسكوب القوة الذرية وتتسق مع التصميم الذي وضعه لنا دريكسلر [27] (الشكل 6 - 12)، لنتمكن بها من مضاعفة قدرة تلك الأجهزة على تجميع الذرات وترتيبها لنؤلف بها الهياكل الذرية أو الجزيئية على المستوى الصناعي الضخم. وفي إطار المتابعة اليومية للأبحاث المتعلقة بهذا الموضوع، وفي ظل هذا النمو المتزايد والتطور المذهل الذي تشهده تقنية التجميع الموضعي، ومع اتباع أسلوب المحاولة والخطأ، فإنني على ثقة بأن هناك كثيرا من الإنجازات التي سوف تتحقق مع ابتكار أنواع جديدة ومتطورة من أجهزة التجميع الذري الموضعي أو الجزيئي، وتطوير أداء الأجهزة المستخدمة حاليا. وكما قال لنا الأب الروحي لعلم وتكنولوجيا النانو - إن جاز لي استخدام هذا التعبير - البروفيسور ريتشارد فينمان: «وفقا لما أفهمه وأستطيع إدراكه، فإن أسس وقواعد الفيزياء، لا تقف عائقا أمام تحقيق المناورة بالأشياء، ذرة تلو الأخرى» [30]. ويقصد فينمان في جملته هذه أنه حيث لا يوجد أي تناقض علمي أو خروج عن مألوف قواعد الفيزياء الحديثة ومفاهيم ميكانيكا الكم، فلا يوجد ما يوقف محاولاتنا ومناوراتنا الخاصة بإيجاد الحيل والسبل التي تؤهلنا إلى تحريك الذرات واستخدامها لبنات بناء الهياكل الذرية للمواد.



الشكل (6 - 12): تصميم مُبسط قام به دريكسلر [27] ليوضح فكرته في إنتاج أجهزة ضخمة روبوتية الأذرع، لها القدرة على تحريك ثلاثة ملايين من الذرات وترتيبها وفقا لنموذج الهيكل المُراد تنفيذه (أضاف مؤلف هذا الكتاب الشرح على الشكل الأصلي الموجود في المرجع الرقم 27).

وقد عبر البروفيسور «مارفن لي منسكي» Marvin L. Minsky - أحد أبرز علماء العالم شهرة في مجال الذكاء الاصطناعي - بدوره عن موضوع التجميع الموضعي الجزيئي للذرات والجزيئات في مقولة شهيرة، قال فيها: «لنفترض أننا بصدد عمل نموذج طبق الأصل لماكينة مثل المخ، الذي يحتوي على تريليونات من المكونات والأجزاء المختلفة، فإننا، وعلى الرغم من تسلحنا بالمعرفة المطلوبة، لا نستطيع الآن تحقيق هذا الإنجاز لبناء كل مكون من تلك المكونات في صورة فردية. ولكن، لو تصورنا أن لدينا ملايين الأجهزة والمعدات التشييدية القادرة على بناء آلاف المكونات في الثانية الواحدة، فإن مهمتنا لن تستغرق إلا دقائق معدودات فقط » [31].

● التجميع الذاتي

علــى الرغم من الإبداع التقني الابتكاري الذي تتمتع به تقنيات طريقة التجميــع الموضعي، فإن ترتيــب الذرات والجزيئــات وتوزيعها واحدة تلو الأخرى بغرض تجميع شــكل الجهاز المــراد المكون من هياكل نانوية البنية Nanostructured، يتطلــب جهــدا كبيرا ولكثير مــن الوقت. وفي كل مرة نصنع فيها هياكل الأجهزة النانوية، نكرر محاولاتنا مرات ومرات من أجل فرض إرادتنا التقنية على تلك الأشــياء المتناهيــة في الصغر (الذرات أو الجزيئات)، والتلاعب بها وتشكيل تجمعاتها على النحو الذي نريده نحن.

والسؤال الذي يطرح نفسه الآن هو، أليس من الأجدى - على الأقل في الوقت الراهن - إذا ما تمكنا تشكيل البنية النانوية المراد الحصول عليها بمجرد خلط محلولين من محاليل المواد الكيميائية - تتركب أساسا من ذرات أحادية - ونتركها كي تقوم بإدارة شؤون تصادم جزيئاتها بعضها ببعض وتصميم الهياكل النانوية المطلوبــة من الجزيئــات الناتجة من تفاعلاتها الكيميائيــة؟ بالتأكيد، الإجابة سوف تكون بـ «نعم»، لأن ذلك يعني توفير الوقت والجهد والتكلفة الخاصة ببناء هياكل الأجهزة النانوية، وضمان إعادة تصنيعها بالمواصفات والكيفية نفسها، ما يعني تلافي الأخطاء الشخصية Personal Errors وتفادي «الملل التقني» الذي يصحب اتباع أسلوب «المحاولة والخطأ».

وبالطبع لم يكن تســاؤلي في الفقرة الســابقة غائبــا عن فكر وجهد العلمــاء الذيـــن أثمـرت جهودهم فــي ابتكار طريقــة كيميائية خاصة وعمليــة، تقوم على فكرة مــزج وتفاعل ذرات المركبــات النانويــة لإنتــاج جزيئـــات تكون البناء الرئيســي للهياكل النانوية، عُرفت باســم التجميع الذاتــيSelf-Assembly، وقد تكون الكلمات، المحفورة في ذهني منذ أن كنت طالبا في مرحلة الماجستير، التي قالها العالم الفرنسي الكيميائي، البروفيســور «جان ماري لــين» Jean-Marie Lehn الحاصل على جائزة نوبــل في الكيمياء العام 1987، حين وصف الكيمياء في كلمات بســيطة وعميقة، بأنها: «اســتجواب للماضي، واستكشاف للحاضر، وبناء جسور المســتقبل»، لربما كانت هذه الكلمات هي التي شحذت همم الكيميائيين، وألقــت مهمة تصنيع هياكل ذرية وجزيئية فــي ملعبهم، خصوصا بعد أن

أدركوا تلك الخطوات المتعثرة البطيئة التي يسـير بها رفاقهم ومنافسوهم من علماء الفيزياء في إنجاز المهمة نفسـها! إنـه لتنافس رائع ومحمود، يهدف إلى تطور الإنسان وتحسين ظروف حياته ومعيشته.

ويمكننا أن نضع تعريفا سهلا وبسيطا لتقنيات التجميع الذاتي حين نصفها بأنها تلك العمليات التي تكوِّن خلالها مجموعة من الذرات أو الجزيئات بشـكل تلقائي تجمعات منتظمة من الجزيئات لتكوين الهياكل الجزيئية المراد الحصول عليها. وتقوم تقنية التجميع الذاتي على أساس أن الجزيئات المكونة لتلك الهياكل، تسـعى دائما إلى أن تكون مستقرة وأن توجد بأقل مستويات ممكنة من الطاقة المتاحة. ولتحقيق هذا الاسـتقرار، فإنها تسعى إلى الارتباط بالجزيئات الأخرى المتاخمة لها، أو بعبارة أخرى تسـعى إلى تكوين لبنات الهياكل النانوية بتجميعها مـع جاراتها من الجزيئات الأخرى، ما يحقق لها الاسـتقرار. وهناك عدد كبير مـن الجزيئات الكبيرة في الطبيعة تقوم بتكييف وضبط مواضعها ومواقعها في الهياكل الجزيئية وذلك عن طريق عملية التجميع الذاتي. وتُعد جزيئات البروتينات والدهون والغرويات Colloids عموما، أمثلة شهيرة لتلك الجزيئات كبيرة الأحجام التي تُجمِّع نفسها لتبني هياكلها الجزيئية المعروفة لنا.

وتهدف تكنولوجيا النانو إلى فرض سيطرتها على الجزيئات كي تتجمع بصـورة ذاتية وفقا لتصميم جيد ورقابة مُحكمة على تلك الجزيئات، وذلك من أجل الحصول على الهياكل الجزيئية المُراد تنفيذها. وليس ثمة شك في أن بمقدورنـا الحصول على هياكل نانوية إذا مـا وظفنا ما توفره الطبيعة والفطرة لتلك الجزيئات بأن تتجمع بعضها مع بعض بأسلوب ذاتي وتلقائي، توظيفا سـليما يمكننا من إنتاج مجموعـة ضخمة من هياكل المواد النانوية تتمتع بخواص فيزيائية وكيميائية مرغوب فيها. وعلى الرغم من العشوائية، أو فـي عبارة أخرى عدم التجانس في تنظيم وترتيب الجزيئات الذي يغلب علـى تجمع تلك الجزيئات بعضها مع بعض، غير أنه يمكن اسـتغلال هذا فـي إنتاج هياكل نانوية لمواد جديـدة تتمتع بخواص فريدة لا توجد في أي مواد أخرى. وهناك عدد من العوامل المهمة (32) المسـؤولة عن كمال عملية التجميع الذاتي وتحقيقها للمهمة المطلوبة منها بنجاح، نوجزها فيما يلي:

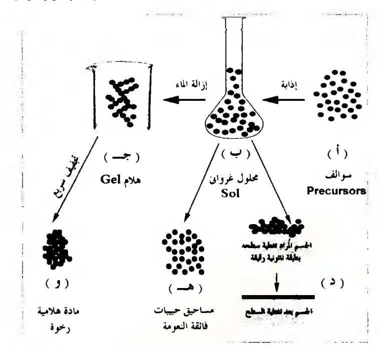
- طبيعة الجزيئات المُستخدمة وخواصها.

- التفاعل بين الجزيئات Intermolecular Interactions.
- المعكوسية أو ارتداد التفاعل وانقلابه إلى الوضع الذي كان عليه بالبداية Reversibility.
- قدرة الجزيئات على الحركة Molecular Mobility.
- الوسط التي تتم فيه العملية.

• طريقة الصول - جل (غروي - هلام)

تعد هذه الطريقة إحدى الطرق المنبثقة عن تقنيات «الكيمياء الرطبة» Wet Chemistry - التي تستخدم السوائل خلال التحضير - حيث يتم توظيفها في إنتاج طائفة عريضة من غرويات Colloids المواد العضوية وكذلك المواد غير العضوية لأنواع مختلفة من المواد، وعلى الأخص أكاسيد المواد الفلزية. وتُعتبر طريقة «الصول - جل» صديقة للبيئة، حيث لا تتخلف عنها أي منتجات ضارة بالبيئة [33]. ولمزيد من التفاصيل حول ماهية هذه الطريقة ونشأتها والتطورات التي أُدخلت عليها، يمكن للقراء المهتمين في الاطلاع على مؤلفات وفيرة في هذا الميدان. على سبيل المثال، أرشح اثنتين من أمهات المراجع [34، 35]، تتوافر بهما المفاهيم الأساسية لهذه الطريقة، والتي قلما تخلو منهما المكتبات الشخصية لعلماء هذا الفرع من العلوم [36].

وقد رأيت عند كتابة هذا الجزء الخاص بوصف عملية «الصول - جل» أن أستعين برسم توضيحي قمت بإعداده، ليصف المراحل المختلفة من خطوات إنتاج هياكل المواد النانوية. وتبدأ هذه الطريقة، في إذابة مساحيق حبيبات المواد الأولية سابقة التحضير، والتي يُطلق عليها السوالف Precursors (الشكل 6 - 13«أ»)، وهي غالبا ما تكون من الأكاسيد الكحولية Alkoxides للمواد. ونتيجة للتفاعلات المصاحبة لإذابة السوالف في المحلول، يتكون ما يعرف باسم «الصول Sol أو المحلول الغرواني»، وهو أشبه بمائع تُعلق به رواسب لحبيبات نانوية فائقة النعومة كما هو موضح في الشكل (6 - 13 «ب»). وعلى النقيض مما هو مبين بهذا الشكل، ونظرا إلى نانوية مقاييس أبعاد تلك الغرويات، فلا يمكننا في الواقع أن نرى تلك العوالق النانوية الأبعاد أو أن ندرك وجودها بالمائع، إلا من خلال الفحص بواسطة أجهزة التكبير العملاقة من الميكروسكوبات الإلكترونية عالية التكبير والدقة.



الشكل (6 - 13): رسم تخطيطي مبسط يبين مراحل إنتاج المواد النانوية من خلال طريقة «الصول - جل» الكيميائية، التي تعد الطريقة الأولى المستخدمة في إنتاج كميات ضخمة من مواد النانو على النطاق الصناعي.

ونستطيع استخدام «الصول» الناتج من عملية الإذابة هذه، لتشبيع وغمس أسطح المواد والمنتجات الفلزية وغير الفلزية به، حيث تترسب جزيئاته على أسطحها في صورة طبقات، نستطيع التحكم في أسماكها وفقا للغرض والاستخدام الذي من أجله غُطيت الأسطح بها (الشكل 6 - 13 «د»). وتُعد هذه الطريقة من أبسط الطرق المستخدمة في إنتاج الشرائح الإلكترونية، وأقلها تكلفة. ويستخدم الصول الناتج أيضا في تغطية أسطح المعدات لحمايتها من التآكل بالصدأ والتآكل بالبري والاحتكاك. وبالإضافة إلى ذلك، فيمكن توظيف «الصول» لإنتاج مساحيق الحبيبات النانوية فائقة النعومة (الشكل 6 - 13 «هـ») من مواد مختلفة، يمكن بعد ذلك تجميع حبيباتها لتشكيلها بواسطة المكابس، حيث نحصل منها على أجسام صلبة عالية الكثافة، يمكن استخدامها كمكونات للماكينات والآلات المختلفة.

ويُهيــأ «الصول» بعد نــزح وإزالة الماء منه (الشــكل 6 - 13«جـ») لتكوين الهــلام Gel [37]، الذي يجفَّف تجفيفا ســريعا للحصول على مواد هلامية، وهي عبارة عن جســيمات نانوية تشــكل في تجمعاتها أشكالا صلبة، ولكنها رخوة وغير متماســكة وتتمتع بلزوجه عالية (الشكل 6 - 13 «و»). وبالإضافة إلى ما تقدم، يُســتخدم الصول كذلك في تحضير أشــكال أخرى مختلفة من المواد النانوية، مثل الألياف، والعصي والأنابيب.

وقد تطورت طريقة الصول - جل، تطورا كبيرا خلال الســنوات العشر الأخيرة، مما رشــحها بقوة لأن تكون الطريقة الأولى التي تتم من خلالها عملية التجميع الذاتي، وذلك نظرا إلى الأسباب التالية:

- مرونتها وسهولة خطواتها في إنتاج أنواع مختلفة من المواد النانوية.
- قدرتهــا على إنتاج كميات صناعية ضخمة من حبيبات المواد النانوية متجانسة التركيب والبنية، تتمتع بنقاوة عالية تصل إلى 99.99 %.
- تُعد الطريقة الأقل تكلفة، والأسرع في عمليات التحضير.
- تنتج من خلالها مواد نانوية لمعظم السبائك والمواد السيراميكية والمواد المتراكبة، عند درجات حرارة غاية في الانخفاض.
- توظيف مواد أولية ســابقة التحضير (السوالف Precursors ومنخفضة التكلفة، تستخدم لإنتاج المواد النانوية.

وسائل التوصيف

يقصد بوســائل التوصيف هنا، تلك الأدوات والتقنيات التي يتم توظيفها في اختبار المواد النانوية المُنتجة من أجل تعيين خواصها واكتشاف السمات الجديدة التي تتمتع بها. وليس ثمة شــك، فإن ضرورة تمتع المشــتغلين والباحثين بمجال تكنولوجيا النانو بمهارات فائقة في اســتخدام وتشــغيل تلك الأجهزة، وأن تكون لديهم الخلفية العلمية القوية التي تؤهلهم لتحليل وتفسير مخرجات نتائجها، هو أحد العناصر الأساسية التي يجب توافرها في العلماء العاملين في هذا المجال.

ورجوعا إلى مقاييس أبعاد المواد النانوية، التي تتراوح بين 1 و100 نانومتر، فلنا أن نتوقع مدى الجهد الكبير الذي بذله علماء النانو في إيجاد طرق مستحدثة، أو تطوير طرق سابقة، من أجل التعامل مع تلك الأجسام المتدنية في الحجم، وتعيين

خواصها بعناية بالغة ودقة كبيرة. ومن ثم، فلا بد من وسيلة تمكننا من رؤية هذه الجسيمات الصغيرة جدا، والتي لا تزيد عن مجموع أطوال أقطار بضع من الذرات، رؤية مباشرة، تمكن الباحث من الحكم عليها وتحديد خواص بنيتها التركيبية.

الميكروسكوبات الإلكترونية

ورجوعا إلى قدرة العين البشرية للإنسان، مهما بلغت شدة إبصارها، فهي لا تستطيع تمييز وتحديد الأشياء التي تقل أبعادها عن 1 ملليمتر (مليون نانومتر) بدقة ووضوح كامل. وحتى الميكروسكوبات الضوئية، التي تقل قوة التكبير فيها عن ألف مرة، تقف عاجزة أمام تحديد مثل هذه الجسيمات المتضائلة الأحجام، حيث لا تستطيع تعيين أبعاد المواد النانوية التي تقل في مقاييسها عن 200 نانومتر. لذا فلم يكن غريبا أن يتم I ختراع وسائل ميكروسكوبية متقدمة، وتطوير قدرات الميكروسكوبات الإلكترونية Electron Microscopes، وتعظيم قدرتها في تكبير الأشياء Magnification (وصلت الآن إلى نحو مليون ومائتي ألف مرة) وذلك من أجل رصد وتوصيف المواد النانوية. وتتمكن الميكروسكوبات الإلكترونية اليوم من تكبير الأشياء الصغيرة جدا، مثل الذرات، وجعلها أهدافاً واضحة المعالم لمستخدم الجهاز.

وعلى الرغم من أنه قد يتم استخدام طرق مساعدة وسريعة، مثل أشعة الحيود السينية (X-ray Diffraction (XRD، في توصيف بعض خواص المواد النانوية المُنتجة، مثل بنيتها التركيبية والبلورية، غير أن هذه الطرق التقليدية غير مؤهلة تأهيلا كاملا لتحديد الخواص الأخرى المتعلقة بمقاييس الأبعاد وكيفية توزيع الذرات داخل الشبكة البلورية للمادة. لذا، تعد الميكروسكوبات الإلكترونية هي السلاح الأول الذي يلزم توافره في أي معمل من معامل تكنولوجيا النانو، والذي من دونه لا نستطيع تعيين خواص مهمة ورئيسية لها.

وتستخدم الميكروسكوبات الإلكترونية شعاعا عالي الطاقة من الإلكترونات Beam of High-Energy Electrons بدلا من الضوء المرئي المُستخدم في الميكروسكوبات الضوئية، وذلك بهدف تعظيم قدرتها في تكبير الأشياء متدنية الأحجام والمقاييس.

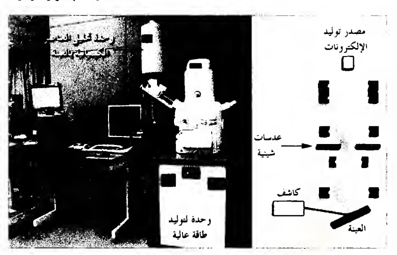
الميكروسكوب الماسح الإلكتروني

يستخدم الميكروسكوب الماسح الإلكتروني Scanning Electron Microscope (SEM) في تحليل وتعيين خواص أسطح العينات السميكة أو الرقيقة من المادة، ومعرفة شكلها - مورفولوجية Morphology - والقيام بتحديد مقاييس أبعادها الخارجية. ويتيح هذا الميكروسكوب قوة تكبير تتراوح عادة بين عشر مرات ونصف مليون مرة، وفقا لنوع الجهاز المُستخدم، ودقته، وخبرة المُستخدم لهذا الجهاز. ومن خلال بعض الإضافات، يتمكن هذا الميكروسكوب من تحديد العناصر الداخلة في تركيب العينة ونسبتها، بدقة جيدة.

ويعرض الشكل (6 - 14) صورة لأحد أنواع تلك الميكروسكوبات، موضحا عليه شرحا لأجزائه الرئيسية، بينما يبين الشكل (6 - 15) صورة مورفولوجية لإحدى عينات المؤلف التي تم اختبارها بهدف اختبار بنيتها، الظاهرة في الصورة على هيئة طبقات مختلفة السمك. وتُعد هذه الصورة، بمنزلة مثال من أمثلة عديدة، يوضح لنا ما يمكن أن نحصل عليه من معلومات خاصة بالعينات المُختبرة بواسطة هذا الجهاز.

الميكروسكوب النافذ الإلكتروني

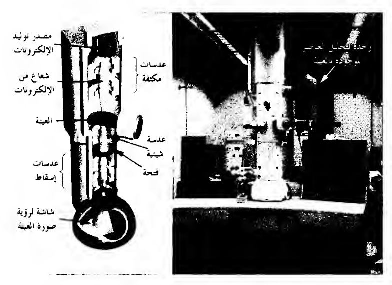
يستخدم الميكروسكوب النافذ الإلكتروني Transmission Electron Microscope (TEM)، شأنه في ذلك شأن الميكروسكوب الماسح الإلكتروني، شعاعاً من الإلكترونات لفحص واختبار العينات. وفي الوقت الذي يقوم فيه الميكروسكوب الماسح بفحص أسطح العينات وتوصيف خواصها المورفولوجية السطحية، يتميز الميكروسكوب النافذ بقدرته على اختراق العينة، التي توضع في مسار الشُعاع الإلكتروني القادم من مصدر توليد الأشعة الإلكترونية الموجود أعلى مكان وضع العينة الشكل (6 - 16)، والنفاذ من خلالها، مسقطا صورتها أفقيا، كما هو مبين في الشكل المذكور. ولضمان نفاذ الشعاع الإلكتروني بنجاح من خلال العينة، تعالج من أجل تخفيض سمكها وجعلها رقيقة، مما يتيح للشعاع اقتحامها والنفاذ منها بسهولة.



الشكل (6 - 14): صورة فوتوغرافية لأحد أنواع الميكروسكوبات الماسحة الإلكترونية الشائعة الاستخدام، الذي استخدمه المؤلف خلال عمله في جامعة طوهوكو اليابانية. رسم تخطيطي للجهاز، موضحا عليه شرح لمكوناته [8].



الشكل (6 - 15): صورة مورفولوجية لإحدى عينات المؤلف، تم اختبارها بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني [16].

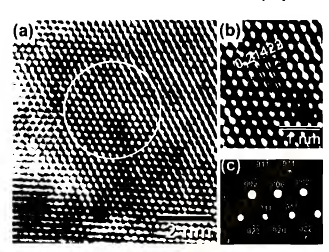


الشكل (6 - 16): صورة فوتوغرافية للميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة، الذي استخدمه المؤلف خلال عمله في جامعة طوهوكو اليابانية. ويظهر بجانب الصورة، رسم تخطيطي للجهاز، موضحا عليه شرح لمكوناته [8].

وتتراوح قوة التكبير الخاصة بالميكروسكوبات الإلكترونية الحديثة إلى نحو مليون مرة، مع دقة متناهية - تتراوح من 0.1 إلى 0.2 نانومتر - في فحص البنية الداخلية للمادة وترتيب الذرات داخل شـــبكتها البلورية، كما هو موضح في الشكل (6 - 17).

ويُعد الميكروسكوب النافذ الإلكتروني الأداة القوية لتكنولوجيا النانو في فحص المواد النانوية وتعيين مقاييس أبعادها وشكلها المورفولوجي. هـــذا بالإضافـــة إلى قدرتـــه على تحديد بنيـــة المـــواد النانوية، مهما تدنـــت مقاييس أبعادها، وتعيين فصيلة انتمائهـــا البلوري. كما يوظف هذا النوع من الميكروســـكوبات الإلكترونية فـــي تعيين بعض الخواص الفيزيائية للمـــادة، مثل نقطة الانصهار، الصلادة، مقاومة الإجهادات، الموصولية الكهربية، ونشـــاطها الكيميائـــي. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الميكروســـكوب النافذ يمكنه تعيين العناصـــر الداخلة في تركيب المادة

النانوية، وتحديد نسبة وجودها بدقة عالية، وذلك عن طريق تجهيزها بوحدات طاقة التشتت الطيفي للأشعة السينية Energy Dispersive X-ray Spectroscopy.



الشكل (6 - 17): صورة توضح البنية الداخلية لإحدى عينات المؤلف، موضحا بها المسقط الأفقي لترتيب وجود الذرات داخل الشبكة البلورية للمادة، تم اختبارها بواسطة الميكروسكوب النافذ الإلكتروني عالي الدقة (16).

ميكروسكوبات المسبار الماسح

كما ذكرنا سلفا، فإن الميكروسكوبات الإلكترونية، بنوعيها (الماسح أو النافذ) تتيح إمكانية فحص عينات المواد النانوية، فحصا دقيقا، من أجل التعرف على خواصها المورفولوجية وتركيبها البلوري، وإلى ما غير ذلك من معلومات مهمة سبق أن تحدثنا عنها بتفصيل أكثر في الجزء السابق من هذا الفصل. بيد أنه، على الرغم من تلك المعلومات الدقيقة والمهمة، فإن الصور الملتقطة للعينات باستخدام الميكروسكوبات الإلكترونية، تكون صورا ثنائية الأبعاد (غير مجسمة). لذا، تعتبر فئة ميكروسكوبات المسبار الماسح Scanning Probe Microscopes (SPMs) من الأدوات المهمة الخاصة بدراسة طوبولوجية Topology وتضاريس أسطح عينات المواد النانوية، ومعرفة ترتيب الذرات عليها. هذا وتوفر تلك الميكروسكوبات

صــورا طوبولوجية مجســمة (ثلاثية الأبعاد) بدقة عاليــة، تُمثل تفاصيل الخواص الفيزيائية (مثل الخواص الكهربية، الحرارية، السُمك، الخواص المغناطيســية) والميكانيكية (مثل الصلادة، مقاومة الإجهادات الخارجية) لسطح عينة المادة المُختبرة.

ويتســنى لهذا النوع الميكروســكوبات - كما ذكرنا ســلفا في هذا الفصــل - من تأدية تلك المهام، من خلال أداة على شــكل إبرة رفيعة، يُطلــق عليها «المجــس («أ» 18 - 6) «Probe»، مثبتة فــي نهاية طرف كابولي الميكروسكوب.

أهمية دراسة أسطح المواد

وقــد يتبادر إلى أذهاننا ســؤال منطقي، وهو لمــاذا كل هذا العناء المتمثــل في قياس خواص الذرات الموجودة على أســطح المواد، بعد أن وفرت لنا أجهزة النوع الســابق من الميكروســكوبات - الميكروسكوبات الإلكترونيــة - معلومــات دقيقة عــن مقاييس أبعاد حبيباتها وشــكل وترتيب ذراتها داخل شــبكتها البلورية؟ وقبل الإجابة عن هذا السؤال، أود أن نعود قليلا إلى صفحات الفصل الخامس، التي ناقشــنا فيها ما يمثله سطح المواد النانوية من أهمية بالغة، من شأنها أن تهيمن على كل خواص وســلوك المادة، وكيف تتميز المواد النانوية عن غيرها من المواد التقليدية، بارتفاع مساحات أســطحها، ووجود معظم ذراتها على تلك الأسطح. ولأن كل الأنشطة والتغييرات الكيميائية والفيزيائية الخاصة بأي مادة تحدث دائما على الســطح، فإن تضاعف قيم هذه الأســطح يؤدي دائما إلى زيادة درامية وكبيرة في تلك الأنشطة الحميدة والمرجوة للمادة، وهذا من شــأنه أن يبرز سمات وخواص فريدة وجديدة تميزها عن بقية المواد.

ومــن ثم، تتضح لنا أهمية دراســة أســطح المواد، وبــدل الجهد في البحث والتنقيب عن إدراك كيفية توزيع وترتيب ذراتها على تلك الأسطح، والتعرف على أوجه الاختلاف أو التجانس بالخواص والســمات المتعلقة بكل ذرة على حدة.

أنواع ميكروسكوبات المسبار الماسح

هناك نوعان رئيسـيان من أنواع ميكروسـكوبات المسبار الماسح هما: الميكروسكوب النفقي الماسح Scanning Tunneling Microscope (STM) وميكروسكوب القوة الذرية Atomic Force Microscope (AFM).

الميكروسكوب النفقي الماسح

يُعتبر الميكروسـكوب النفقي الماسح أول ميكروسكوب في هذه الفئة من ميكروسـكوبات المسبار الماسـح، والذي - كما ذكرنا سلفا - قد اختُرع في العـام 1981 بواسـطة عالمين ألمانيين هما «جيرد بنينـغ» Gerd Binning و«هينريتش روهرير Heinrich Rohrer، واللذان كانا يعملان بمعامل شركة آي بي إم IBM، الكائنة بمدينة زيورخ السويسرية، والذان تقاسما في العام 1986 جائزة نوبل في الفيزياء، الممنوحة لهما عن هذا الاختراع العبقري.

- فكرة العمل

يقوم هذا النوع من ميكروسـكوبات المسـبار الماسـح بأداء «مهمته الاستكشـافية»، من خلال إبرة رفيعة حادة، تمر على ذرات سطح عينة المـادة المُراد تعيين خواصها. وهذه الإبرة (المسـبار) الرفيعة الحـادة، المُتصلـة بـذراع كابولي الجهـاز، يتم تصنيعهـا من فلز التنجسـتن أو فلز البلاتين. ويُشـترط في هذه الذرة، أن تستجيب للإجهادات الميكانيكية الناشئة المؤثرة في ذرات العينة عند ملامسة الإبرة لها، في توليد جهد كهربي بين الذرة الأحادية وذرات سـطح مادة العينة.

وتقـوم الإبرة «بجـس» كل ذرة من الذرات الموجودة على سـطح العينة، وذلك من خلال رحلتها المسـحية، التي تسير فيها الإبرة ببطء على خطوط وهمية مستقيمة ومتوازية، يتباعد بعضها عن بعض بمسـافات متدنية الصغر، بحيـث لا تزيد على قطر الذرة الواحدة. وخلال هذه الرحلة المسـحية، تمر الإبرة على السـطح صعـودا وهبوطا عند المرور، لضمان ثبات شـدة التيار الكهربي

عنـد قيمة ثابتة، مما يـؤدي إلى تمكن الإبرة، فـي رحلتها، من المحافظة على تسـاوي المسـافات البينيـة الفاصلة بين خطوط الشبكة الوهمية.

وتجدر الإشـارة هنا، إلـى أنه عند اقتراب تلـك الإبرة الحادة المصنعـة مـن مـواد فلزيـة ذات موصليـة جيـدة للكهرباء - كالتنجستن أو البلاتين - بالقرب من سطح مادة موصلة - مادة العينة - فإنه يتولد تيار، يُعرف باسم التيار النفقي Tunneling Current، ينشـأ معه فرق في الجهـد الكهربي بين مادة الإبرة وسطح مادة العينة.

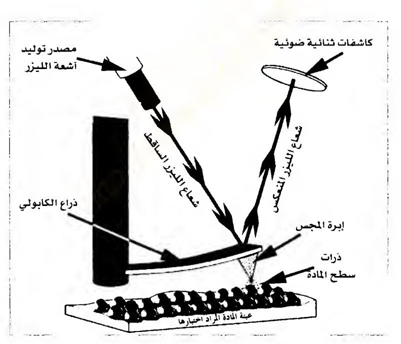
• ميكروسكوب القوة الذرية

على الرغم من اعتبار الميكروسـكوب النفقي الماسح، أحد أهم الأجهزة التي أدت إلى تقدم البحوث والاكتشافات الخاصة بعلم وتكنولوجيا النانو، فإنه يستخدم فقط في اختبار عينات المواد النانوية ذات الموصلية الكهربية، الأمر الذي حد من تطبيقاته. لذا، فقد قام «جيرد بنينغ» Gerd Binning مع «كالفين كوات» Calvin Quate في العام 1986 بعمل تعديلات جوهرية لهذا الميكروسـكوب، والذي أطلقا عليه اسم ميكروسـكوب القوة الذرية Atomic Force Microscope (AFM) [(38)]. وقـد أدت تلـك التعديلات الابتكارية إلى زيادة مسـاحة المواد التي يمكنه اختبار خواص السطح لها، بحيث شـملت المواد رديئة الموصلية الكهربية ومواد العوازل الكهربية. هذا بالإضافة إلى تعديل تصميم «المجس» ليكون مقياس بُعد قطر طرفه المدبب الحاد، غاية في الصغر، مما أتاح زيادة في دقة عمل المجس (نانوي الدقة)، ومصداقية بمخرجات نتائج فحوصه [(39، 40)] لأسطح المواد النانوية.

هذا ويختلف ميكروسكوب القوة الذرية عن ميكروسكوب المسبار الماسح، في شكل ونوع مادة المجس المستخدمة، والذي يكون على هيئة رأس حاد منحن (على شكل خطاف Hook مصنوع من مادة شبه موصلة، مثل السيليكون.

وكمـا هو موضح فـي الشـكل «6 - 18»، فـإن ذراع الكابولي الحامل للمجـس، يبدأ في التحرك ببطء فوق سـطح العينة المـراد اختبار خواص

سـطحها. وخلال هذه الرحلة، يقترب المجس من ذرات السطح، الأمر الذي يؤدي إلى تولد قوى تجاذب أو تنافر بين إبرة المجس وبين ذرات سطح العينه، مما يؤدي إلى انحراف في موضع ذراع الكابولي (صعودا أو هبوطا). ويبين الشكل نفسه، أن قياس مقدار القوة المسؤولة عن إحداث هذا الانحراف في موضع ذراع الكابولي، يتم عن طريق سـقوط شـعاع من الليزر على السطح الخلفي للذراع المُنحرف، ويتم ذلك في كل مرة ينحرف فيها هذا الذراع عن موضعه الأصلي. وهذا الشعاع الساقط ينعكس على مجموعة من الكاشفات الثنائيـة الضوئية Photodiode Detectors عاليـة الدقة، والتي من خلال تحويلها للإشـارات الضوئية القادمة من أشعة الليزر المنعكسة إلى إشارات كهربية، يتم تكوين خريطة طوبوغرافية عالية الدقة، تُبرز تفاصيل تضاريس وخواص سطح المادة، كما هو مبين في الشكل (6 - 19).



الشكل (6 - 18): رسم توضيحي يبين فكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية في اختبار خواص سطح المواد. وفي الشكل، يظهر ذراع كابولي الجهاز الذي ينتهي بإبرة المجس في أثناء تحركها أعلى ذرات سطح عينة المادة المراد اختبارها.

● **أنواع أخرى من ميكروسكوبات المسبار الماسح**

بالإضافة إلى النوعين السابقين من ميكروسكوبات المسبار الماسح، توجد أنواع مختلفة أخرى، لا يزال البعض منها قيد البحث والتطوير، نذكر منها الأنواع التالية:

- ميكروسكوب القوة المغناطيسية Magnectic Force Microscope.
- ميكروسكوبات الليزر الماسح Laser Scanning Microscopes.
- الميكروسكوبات الضوئية الماسحة قريبة الحقل Near-Field Scanning Optical Microscopes.

وتتميز هذه الأنواع المُبتكرة من ميكروسكوبات المسبار الماسح، بدقتها العالية وقدرتها الفائقة على تعيين خواص متعددة لسطح عينة المادة، منها:

- تحديد البنية الإلكترونية عند درجات الحرارة المنخفضة.
- تحديد التركيب الكيميائي.
- تعيين الخواص البصرية.
- تعيين الخواص الحرارية.



7

الكربون: أمير المواد وعميدها

«تحمل المواد النانوية بين جنباتها، صفات الغرابة والعظمة في وقت واحد»! هذا ما قاله لي أستاذي العالم الجليل البروفيسور كنجي سوزوكي Prof Kenji Suzuki في العام 1985، حين كنت شابا يافعا في بداية مشواري لدراسة الماجستير في علم وتكنولوجيا النانو بمعمل هذا الرجل النابغة بجامعة طوهوكو اليابانية. ظلت هذه الكلمة عالقة في ذهني إلى الآن، منذ لحظة لقائي بهذا الرجل القدير في مكتبه المتواضع الكائن في أكبر مؤسسة بحثية في اليابان تهتم بالمواد المتقدمة عامة، وبمواد وتكنولوجيا النانو على وجه الخصوص. ولا أخفي على القارئ الكريم أنني في تلك اللحظة ترددت في أن أسأله: «وما سر هذه الغرابة المغموسة بالعظمة؟».

«أرجح أن تؤدي الزيادة في أعداد ذرات الكربون إلى زيادة نشاط وشراهة تلك الكريات، مما يعني إعلان مزيد من الاكتشافات الجديدة، وفتح آفاق متقدمة من التطبيقات التكنولوجية الفريدة في المستقبل القريب»

المؤلف

في ذلك الوقت، كان الوسط البحثي في العالم كله، مازال «يحبو ويسير مترنحا» بين جنبات مواد وتطبيقات تكنولوجيا النانو. وكانت الآمال المنعقدة عليها كبيرة، ولكن النتائج البحثية الخاصة بها ما زالت متواضعة، تتدنى عن مستوى تلك الأمال العريضة. وما زاد الطين بلة، هو امتزاجها - أي تكنولوجيا النانو - بالأساطير وروايات الخيال العلمي، مما جعل المجتمعات المدنية بالدول المتقدمة - وحتى حكومات تلك الدول - في تلك الفترة المبكرة من مشوار النانو مع البشرية، تعتقد أن النانو، على صعيدي المواد والتكنولوجيا، ما هي إلا إرهاصات متوجة بإبداعات علمية وبحثية لمجموعة من الباحثين المتميزين من ساكني «الأبراج العاجية»، الذين لا يدركون تفاصيل المشاكل اليومية الدقيقة التي يعانيها رجل الشارع العادي! كان هذا هو الانطباع السائد بين البشر خلال العقدين الأخيرين من القرن المنصرم.

لم تطل على البروفيسور سوزوكي فترة ترددي، فأردف شارحا في بساطة شديدة أسباب ذلك التميز المغلف بالغرابة والعظمة الذي تحتكره المواد النانوية. وليأذن لي القارئ الكريم بأن أنقل إليه هذا الشرح، ملخصا إياه.

المواد النانوية متميزة، حيث تجمع في طيات بنيتها الذرية خواص مختلفة وعديدة، تخول للمادة الواحدة منها أن تستخدم وبكفاءة نادرة في أكثر من تطبيق. وتجمع الحبيبات النانوية لمواد السيراميك في صفاتها على العديد من المتناقضات المتميزة، فصلادتها وبأسها الشديدان، لم يحرماها من أن تكون مرنة وصلبة. لذلك، نجد أن مواد السيراميك النانوية، مثل الزجاج والفخار، لا تتكسر بسهولة عند سقوطها أو الطرق عليها، وهذا شيء غريب في حد ذاته! إذ كيف يتمتع السيراميك بخواصه المعروفة عنه إلى جانب تمتعه بفئة الخواص التي تحتكرها المواد الفلزية لنفسها فقط؟ وكان سؤاله هذا، بمنزلة أول توجيه يصدر عنه كي أحاول مجتهدا، خلال مرحلتي دراستي للماجستير والدكتوراه بمعمله، الإجابة عن هذا السؤال.

الكربون وتكنولوجيا النانو

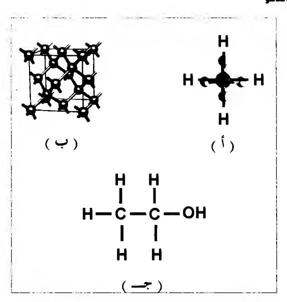
ليس ثمة من شك في أن عنصر الكربون C، الذي يدخل في تكوين نحو 19% من كتل أوزان أجسامنا، يعد عنصرا أساسيا ومهما ترتبط به حياتنا على سطح هذا الكوكب، فهو يدخل في تركيب البروتينات، والكربوهيدات، والدهـون والأحمـاض النوويـة Nucleic Acids. وتوجـد ذرات الكربون فـي كل مكان مـن حولنا، وفي ملايـين من جزيئات المـواد المختلفة التي نسـتخدمها في كل لحظة مـن لحظات حياتنا اليومية، فـي الغذاء الذي نتناوله، والملابس التي نرتديها، والأقلام التي نكتب بها، وأيضا في الوقود الذي يحرك مركباتنا، في البر والبحر والجو.

وتوجـد مركبات الكربون في الصـور الثلاث للمادة، فهي قد تكون في الصورة الغازية (مثـل غاز البروبان Propane)، والسـائلة (مثل البنزين) والصلبـة (مثل الغرافيت والماس). وتتميز مركبات الكربون بتنوع خواصها وبتباين سماتها، وذلك يرجع إلى ثلاثة عوامل رئيسية هي:

- لـذرة الكربون القدرة على الارتباط مـع معظم ذرات المواد، وذلك من خلال روابط قوية، تعرف باسـم الروابط التساهمية Covalent Bonding، والتـي من خلالها ترتبط ذرة واحدة من الكربـون مع أربع ذرات أخرى لمادة واحـدة أو مواد مختلفة، كما هو مبين في الشـكل (7 - 1 «أ») الذي يوضح نموذجا شـهيرا للرابطة التسـاهمية الناشـئة بين ذرة كربـون وأربع ذرات هيدروجين لتكوين جزيء غاز الميثان CH4، Methane.

- حين ترتبط ذرة الكربون بذرة كربون أخرى، والذرة الأخرى ترتبط بذرة ثالثة من الكربون، فتتكون شبكة من ذرات الكربون Carbon Network لها بنية ماسية Diamond-like Structure الشكل (7 - 1 «ب»).

- لكل ذرة من ذرات الكربون المؤلفة لسلاسـل شـبكة الكربون الحرية، لأن ترتبط بأربع ذرات لمواد أخرى، ليسـت بالضـرورة أن تكون من الكربون، لتكوين سلسلة Chain متشابكة مؤلفة من ذرات مواد مختلفة (الشكل 7 - 1 «ج»). ويؤدي هذا التعدد النوعي في الذرات المنتسبة لمواد مختلفة الخواص، إلى تكون مركبات تحمـل في خواصها صفات جامعة لكل خواص وصفات ذرات المواد الداخلة في تكوينها، مما يؤدي إلى اتساع رقعة تطبيقاتها في قطاعات كثيرة ومتنوعة.



الشكل (7 - 1): ترتبط ذرة الكربون بذرات الكربون المماثلة لها أو بذرات مواد أخرى عن طريق الرابطة التساهمية لتكوين ملايين من المركبات مثل (أ) غاز الميثان، (ب) الماس، (ج) الكحول الإيثيلي [(1)].

وفي إطار تلك الخواص الفريدة والمتميزة لهذا العنصر، لم يكن من الغريب أن يستأثر الكربون بشغف واهتمام علماء تكنولوجيا النانو، وأن يخصصوا له مساحة بحثية واسعة، منذ منتصف ثمانينيات القرن الماضي، وحتى يومنا هذا، خاصة بعد ما تحقق من إنجازات تكنولوجية في مجال تخليق المواد الجديدة خلال الفترة السابقة، والتي تبلورت في توظيف الكربون في إنتاج مواد شديدة القوة والبأس، مثل ألياف الكربون Carbon Fibers التي تم استخدامها كمواد مقوية وداعمة للبلمرات والمواد الفلزية، وذلك بغرض تأليف مواد متراكبة Composite Materials تجمع في خواصها الصلادة والقوة، بجانب تمتعها بالمتانة، اللدانة والقابلية للتشكل.

وبعد تحقيق تلك الإنجازات - التي مازالت مستمرة حتى اليوم - المرتبطة بعلم المواد وتخليق مواد كربونية متقدمة تتلاءم مع المتطلبات الملحة والكثيرة لتكنولوجيات إنتاج المعدات والأجهزة الحديثة، خرج الكربون من تلك الدائرة المغلقة والضيقة التي ارتبط بها خلال القرون السابقة، فلم يعد فقط مصدرا من مصادر الوقود، بل وجد لنفسه وظائف مرموقة في قطاعات صناعية كثيرة مثل صناعة السيارات، والطائرات والمركبات الفضائية، وصناعة الإلكترونيات، وصناعة الأدوات والأجهزة الرياضية. فلم يعد غريبا اليوم أن نسمع عن استخدام الكربون، كمادة رئيسية لإنتاج العديد الأجهزة المحمولة من الحواسب، والهواتف، وغير ذلك من الأجهزة الحديثة والمتقدمة التي تعبر عن روح هذا القرن الذي نعيش به. وأحسب أن ذرة الكربون سوف تلقى الاهتمام البحثي نفسه والتقدير التطبيقي، وربما أكثر مما هو عليه الآن، خلال المراحل المتعاقبة لحقبة تكنولوجيا النانو من هذا القرن.

الصور المختلفة للكربون

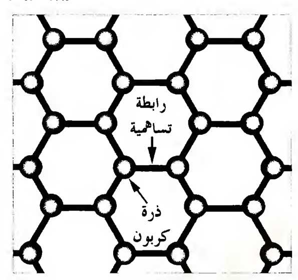
من أهم الأسباب التي جذبت علماء تكنولوجيا النانو نحو الكربون، واعتبارهم له كأهم مادة أولية لتلك التكنولوجيا الجديدة، هي الصور المغايرة والمختلفة Allotropes التي يتم عليها ترتيب ذرات الكربون النقي، بحيث تشكل مجموعة متنوعة من الصور، مثل الكربون غير البلوري أو الأمورفي، والجرافيت، والماس، والفولورين. وكما ذكرنا سلفا في الفصل الثالث من هذا الكتاب، فإن اختلاف الصور والترتيب الذي توجد عليه ذرات أي مادة، يؤدي إلى هذا التنوع والتباين في الخواص والسمات الذي نلاحظه بين المواد. وخلاصة القول هنا، أن تلك الأشكال المختلفة التي يوجد عليها الكربون توفر له أن يتمتع بمجموعة من الخواص العديدة، وفقا للبنية الهيكلية للشكل الموجود عليه، وهذا يعني فتح المجال أمام أشكاله المتنوعة والمتباينة للاستخدام في التطبيقات الصناعية المختلفة.

● **الغرافيت**

عــادة ما يصنَّف الغرافيــت Graphite إلى فئتين، فئة خام Ore الغرافيــت الموجودة أصلا في القشــرة الأرضية [2]، فئة الغرافيت المخلق أو المصنع Synthetic Graphite الذي يخلَّق من فحم الكوك معمليــا. ويظهر الغرافيت الطبيعي أو المخلــق على هيئة طبقات أفقية ممتدة رقيقة الســمك Horizontal Thin Layers، لذا فهو يندرج تحت فئة المواد ثنائية الأبعاد. وتتشكل تلك الصفائح الرقيقة Thin Sheets عن طريق الروابط التســاهمية التــي تربط ذرات الكربون بعضها ببعض، مكونة في ذلك تشكيلات كربونية سداسية منتظمة، كما هو موضح بالشكل (7-2). ويحظى الغرافيت باهتمام علمــاء تكنولوجيا النانو، وذلك نظرا إلى ما يتمتع بــه من خاصيتين مهمتين هما: القوة Strength، والموصلية الكهربية Electrical Conductivity.

وبالإضافة إلى ما نعرفه عن دخول الغرافيت في صناعة أقــلام الرصاص، وعلى الرغم من اســتخدامه في عدة مجالات تقليدية أخــرى، مثل صناعة بواتق Crucibles صهــر الفلزات بالأفران في درجات الحــرارة المرتفعة، والقوالــب Moulds التــي تســتقبل مصهــور الفلزات Molten Metals ليصــب بهــا، غير أنه يســتخدم الآن وبشــكل رئيســي في عديد من القطاعــات الصناعية الأخرى مثل:

- الأجهزة الكهربائية.
- البطاريات.
- الأقطاب الكهربية Electrodes وصناعة أفران القوس الكهربي Electric Arc Furnaces المستخدمة في صهر الفلزات.
- مواد التشحيم Lubricants.



الشكل (7 – 2): شكل تخطيطي يبين البناء الهيكلي لطبقة رقيقة السمك من الغرافيت، تشكلت عن طريق الروابط التساهمية الناشئة بين مجموعة من ذرات الكربون، رتبت نفسها واصطفت لتشكيل حلقات سداسية مترابطة [1].

● الماس

يعد الماس Diamond أصلد مادة عرفها الإنسان، حيث يعزى تمتعه بهذه الصفة إلى الترتيب الذري الفريد لذرات الكربون داخل هيكله (الشكل 7 – 1 «ب») والتي خلعت عليه رداء تلك الصفة الثمينة، علاوة على تقليدها له بكثير من الصفات الباهرة الأخرى، التي نذكر منها:

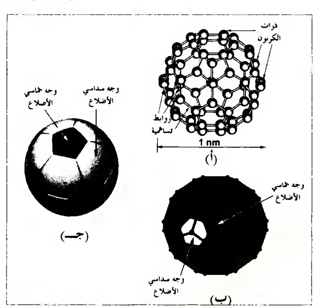
- انخفاض معامل الاحتكاك Low Coefficient of Friction.
- ارتفاع قيم التوصيل الحراري High Thermal Conductivity.
- ارتفاع قيم المقاومة الكهربية High Electrical Resistivity.
- انخفاض قيمة معامل التمدد الحراري Low Thermal Expansion Coefficient.

وعلى الرغم من كل هذه الصفات الرائعة التي تتكتل مجتمعة في بلورات الماس الباهرة، فإنه، وعلى النقيض من الغرافيت «الرخيص» الذي لايجد لنفسه مكانا داخل علب حفظ المجوهرات الأنيقة بمحلات ومعارض الحلي، أو أن يفتخر أعلياء القوم باقتنائهم بلوراته وحبيباته مثلما يفعلون مع شقيقه الماس، فإن الترتيب الذري للكربون في الماس، قد سحب منه خاصية التوصيل الكهربي، ليميز بها الجرافيت، ليجعل منه النجم الألمع في دنيا التطبيقات الصناعية الحديثة.

• الفولورين

ليس من المألوف أن تُكتشف مواد جديدة تتميز بقدرتها على تغيير حياة الإنسان أو أن تكون سببا في تفجير ثورات تكنولوجية عملاقة، بصورة متكررة خلال فترات زمنية قصيرة. وقد يستغرق الأمر لتحقيق ذلك عدة عقود، أو ربما عدة قرون. ويمثل الفولورين Fullerene، نموذجا لتلك المواد الفريدة شديدة التميز، التي استطاع الإنسان التوصل إليها وإنتاجها، قبل أن ينتهي القرن الماضي بخمسة عشر سنة.

والفولورين الذي يمثل الصورة الثالثة من صور الكربون بعد الغرافيت والماس يعرف باسم «الكربون الستيني» (C_{60})، نظرا إلى أن الجزيء الواحد له يتكون من ستين ذرة من الكربون، ترتبط كل واحدة منها بثلاث ذرات أخرى مماثلة، كما هي الحال تماما في مادة الغرافيت. لكن الخاصية المميزة وغير المسبوقة التي ينفرد بها الفولورين، هي أن ذرات الكربون المؤلفة لجزيئه الواحد، تكون هيكلا هندسيا كروي الهيئة، يبلغ قطره نحو 1 نانومتر (الشكل 7 - 3 «أ»). وتتساهم تلك الذرات في ترابطها لتكوين 32 وجه، منها 20 وجها سداسيا و 12 خماسيا (الشكل 7 - 3 «ب»)، لتتشابه في مظهرها وتعدد أوجهها مع كرة القدم - ساحرة الملايين أو الساحرة المستديرة (الشكل 7 - 3 «ج») كما يسميها كثير من معلقي البرامج الرياضية.



الشكل (7 - 3): (أ) رسم تخطيطي يبين كيف تتساهم ستون ذرة من ذرات الكربون لتكوين روابط تساهمية قوية تجمعها لتأليف أشكال هندسية كروية، تعرف باسم الكربون الستيني C_{60} أو كريات بكي Buckyballs. ويوضح الرسم في (ب) كيف ينتج عن الترابط التساهمي القائم بين ذرات الكربون، أوجه خماسية وسداسية، تؤلف هيكل «كرية بكي»، لتحاكي في شكلها هذا المظهر الخارجي لكرة القدم (ج)[1].

وأود أن أسرد هنا، في عجالة، قصة اكتشاف الفولورين والتوصل إلى إنتاج تلك الكريات الكربونية الضئيلة التي أذهلت - ومازالت - العالم بخواصها غير المسبوقة وتطبيقاتها الفريدة. ففي سبتمبر من العام 1985 أعلن ثلاثة من علماء الكيمياء البارزين، هم البروفيسور روبرت كورل Prof Robert F. Curl، البروفيسور السير هارولد كروتو Sir Prof. Harold Kroto والبروفيسور ريتشارد سمالي Richard E. Smalley بجامعة رايس Rice University الأمريكية، عن توصلهم لاكتشاف نوع جديد من صور الكربون، أطلق عليه - كما ذكرنا سلفا - اسم الكربون الستيني C_{60}، وقد ضم هذا الفريق البحثي اثنين من طلاب الدراسات العليا بالجامعة نفسها، هما جمس هيث James Heat[3] وشون أوبرين Sean O'Brien[4]، اللذان قاما بدور المعاونة في إجراء بعض الاختبارات المعملية.

وقد زلزل هذا الاكتشــاف، بما يمثله من ســبق علمي غير متوقع، ربوع الوسط العلمي، وعُلقت عليه آمال عريضة، وأحلام تطبيقية كثيرة. وقد أدى هذا الكشف الكبير إلى ترسيخ قواعد تكنولوجيا النانو، وتأكيد قدرتها على تخليق مواد غير مسبوقة، لتفتح بها آفاقا عريضة من التطبيقات الرائدة.

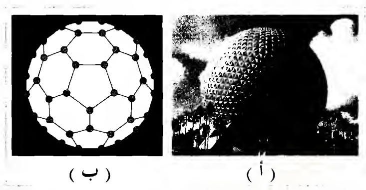
وقد اســتغرق الأمر تسع ســنوات، ليتيقن الوســط العلمي من حقيقة المــادة، وصحة التجارب التي أجراها الفريــق البحثي بجامعة رايس، حتى تقاسم الأساتذة الثلاثة جائزة نوبل في الكيمياء لعام 1996، والتي صادف تاريخها الذكرى المائة لوفاة مؤســس الجائزة العالم البورفسور ألفرد نوبل Alfred Nobel. وعلى الرغم من عدم مقاســمة طالبي الدراسات العليا - جمس وشون - للجائزة، فإنهما نالا كثيرا من التقدير والإعجاب لمشاركتهما الفعليــة فــي صنع هذا الإنجــاز التاريخي المدون بأحرف من نور بســجل الاكتشافات والاختراعات البشرية، منذ فجر التاريخ وحتى يومنا هذا.

ومــن الطريــف أن يذكر هنــا أن الفولورين Fullerenes قد ســمي بهذا الاســم نسبة إلى اســم المهندس المعماري الشهير ريتشــارد بكمينستر فولور Richard Buckminster Fuller (5) الــذي اشــتهر وذاع صيتــه في تصميم القباب الجيوديسية Geodesic Domes (6) التي تتشابه في مظهرها مع تلك الكريات الكربونية المخلقة في المعمل (الشكل 7 - 4). لذا فقد أطلق عليها - أي الكريات الكربونية - اسم «فولورين بكمينستر Buckminster Fullerene»، بيد أن هذا الاســم لم ينل الاستحسان اللائق. وقد أجاد الفريق حين اختاروا «كرات بكي» أو «بكي بول» (Buckyball) كاسم تدليل متداول وبسيط.

وقد أردت من سرد قصة اكتشاف «البكي بول»، أن أذكر نفسي وأذكر قراء هذا الكتاب من الشباب العربي الواعد، بفضيلة التعاون، ليس فقط في مجال البحث العلمي، بل في كل المجالات، فلكل منا دوره، صغر هذا الدور على مسرح الحدث أم كبر. وكما رأينا، فإن الدور الذي قام به شابان من طلبة الماجستير والدكتوراه بجامعة رايس، المتمثل في تحليل واختبار مخرجات التجارب الإبداعية لأساتذتهما العلماء، هو دور رئيسي ومؤثر، أدياه بكل جد واجتهاد وأمانة.

وأتذكر هنا، مع القارئ الكريم، أمير الشــعراء أحمد شــوقي حين قال في قصيدته الرائعة سلوا قلبي:

وما نيل المطالب بالتمني ولكن تؤخذ الدنيا غلابا
وما استعصى على قوم منال إذا الإقدام كان لهم ركابا



(ب) (أ)

الشكل (7 - 4): مقارنة في الشكل والمظهر بين أحد المباني الفريدة التي صممها المهندس المعماري المبدع ريتشارد بكمينستر فولور لتكون على شكل قبة جيوديسية (أ) [5] و(ب) «البكي بول»، التي عمل على تخليقها معمليا، فريق عمل بحثي بجامعة رايس الأمريكية في العام 1985 [1].

تطبيقات كريات بكي بعالمنا الواقعي

خضعت جزيئات «البكي بول» منذ اكتشافها لعديد من الاختبارات المختلفة المجراة عليها، حيث أكدت على تمتع تلك الفئة من المواد الكربونية بقائمة طويلة من الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية غير المسبوقة، مما كان له بالغ الأثر لترشيحها وبقوة في كثير من المجالات التطبيقية المختلفة. وتعد القطاعات الصناعية الخاصة بإنتاج الحواسيب، الأجهزة الإلكترونية، الحساسات Sensors وكذلك خلايا الوقود Fuel Cells، أهم القطاعات الإنتاجية المستفيدة من كريات بكي.

وخلال السنوات القليلة الماضية، أظهرت نتائج البحوث الطبية والدوائية المجراة على البكي بول، بأنها مادة واعدة بالتطبيقات المتقدمة في قطاع الطب والدواء. واكتشفت واحدة من كبرى شركات تصنيع الدواء العالمية، مدى فاعلية الفولورين عند استخدامه في إنتاج عقاقير السيطرة على الآثار التدميرية الناجمة عن اعتلال المخ بأحد الأمراض الدماغية، مثل مرض «ألزهايمر» Alzheimer ومرض «اعتلال الأعصاب الحركية»، المعروف باسم «لو جيهريج»

Lou Gehrig's (ALS)، هذا في الحين الذي اكتشفت فيه شركة دوائية أخرى معروفة، تطبيقا مهما لتلك الكريات، التي أظهرت فاعليتها بأن تستخدم كمضادات أكسدة Antioxidants قوية، حيث برهنت نتائج التجارب التي أجرتها تلك الشركة على قدرة البكي بول في معادلة Neutralization الجذور الحرة، المعروفة باسم الشقائق Free Radicals داخل جسم الإنسان، وذلك من خلال تكوين رابطة تساهمية بين الإلكترون الحر لجزيئات وذرات تلك الشقائق وبين إحدى ذرات الكربون التي تتألف منها كريات بكي، مما يعني وقف نشاطه وتحييده عن أداء أنشطته السلبية على الوظائف الحيوية داخل الجسم. ولأن كرة بكي الواحدة تتألف من 60 ذرة من ذرات الكربون توجد على السطح الخارجي للكرة، ولأن ذرة الكربون الواحدة تستطيع أن ترتبط تساهميا بأربع ذرات أو جزيئات في وقت واحد - بخلاف ارتباطها بذرات الكربون المماثلة لها بكرة بكي - فلنا أن نتخيل مقدار العدد الضخم من الإلكترونات الخاصة بالشقائق التي لذرات الكربون الارتباط معها ووقف نشاطها.

وبالإضافة إلى ما سبق، ما زال هناك العديد من التطبيقات الفريدة المقترحة للبكي بول في مجالات الطب، والدواء، والتكنولوجيا الحيوية، والتي تُنشر بصورة شبه شهرية في عدد ضخم من المجلات العلمية المرموقة [7، 8].

وخلال السنوات العشر الماضية وحتى اليوم، فإن الجهود البحثية الخاصة بتحسين خواص كريات بكي تتواصل وتسير على قدم وساق. حيث أدت زيادة عدد ذرات الكربون الموجودة بها، مما هي عليه الآن - 60 ذرة - إلى 70 [9]، 76 [10]، 84 [11] ذرة، إلى اكتشافات مثيرة لصور أخرى من الكربون، مثل C_{70} وC_{76} وC_{84}، تطالعنا بها الدوريات العلمية المتخصصة في كل يوم. وأرجح أن تؤدي تلك الزيادة في أعداد ذرات الكربون إلى زيادة نشاط وشراهة تلك الكريات، مما يعني إعلان مزيد من الاكتشافات الجديدة، وفتح آفاق متقدمة من التطبيقات التكنولوجية الفريدة في المستقبل القريب.

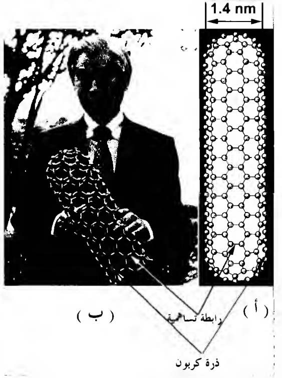
أنابيب الكربون النانوية

انتهينا في الجزء السابق من معرفة ومناقشة الكربون الستيني أو كرات بكي، واستعرضنا أهم الخواص التي تتميز بها، وماهية التطبيقات الفعلية لتلك الكريات. ولم يكد الوسط العلمي يفيق من دهشته وانبهاره عقب إعلان اكتشاف البكي بول في العام 1985، حتى فاجأنا البروفيسور الياباني الشهير إيجيما S. Iijima، الباحث العلمي بشركة إن إي سي NEC اليابانية، في العام 1991

باكتشافه أنابيب الكربون النانوية Carbon Nanotubes [12]، التي بهرت، وما تزال، العالم كله! وكأن القرن الماضي كان على موعد مع القدر ليفصح لنا عن اكتشـــافات «نانو تكنولوجية» جديدة خلال عقوده الأربعة الأخيرة. وقد مهدت هذه الفتوحات النانو تكنولوجية المتوالية والمبتكرة، الطريق أمامها كي تتربع على عرش «تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين»، وذلك بوصفها أهم التكنولوجيات التي عرفها الإنســـان حتى اليوم. ولأنني عاصرت ومارست التجارب البحثية خلال الحقبات الأولى من عمر تكنولوجيا النانو، وبمنتهى الأمانة وعدم التحيز لمجالي أو لأحد أســـاتذتي - البروفيسور إيجيما - أود أن أؤكد للقارئ الكريم أن مـــا قام به إيجيمـــا وفريقه كان بمنزلة إعجاز أكاديمـــي وبحثي في مجال علوم النانو والمواد المتقدمة غير مسبوق. أيضا، فقد مثل هذا الاكتشاف لطمة قوية لكل المتشككين في هوية تكنولوجيا النانو، ومسمارا أخيرا في نعوش تلك الشـــكوك! ومن الطريف أنه بعد أشهر قليلة من ذلك الاكتشاف، «هرول» كثير من هؤلاء المتشـــككين صوب «إمبراطورية تكنولوجيا النانو»، ســـاعين إلى أن يكونوا من حاشيتها وتابعيها! ولم لا فأبواب العلم غير موصدة، ومجال البحث العلمي في تكنولوجيا النانو مفتوحة لجميع المتخصصين الحقيقيين المحترفين، أما الهواة من مدعي التخصص، فهذا موضوع آخر!

ماهية أنابيب الكربون النانوية؟

أنابيـــب الكربـــون النانوية، التـــي تتفرد بصفات وخواص مدهشـــة لم يعرفها الإنســـان من قبل، هي عبارة عن أنابيب طولية مجوفة ذات أقطار متناهيـــة في الصغـــر، حيث تتدنى مقاييس أبعـــاد أقطارها إلى نحو 1.4 نانومتـــر. ويوضح الشـــكل (7 - 5) في (أ) رســـما تخطيطيـــا لأنبوبة من تلـــك الأنابيب، والتي فيها تترابط ذرات الكربون بعضها ببعض بواســـطة الروابـــط، متطابقة في هذه بنفس الروابط التســـاهمية التي تجمع بينها في مـــواد الكربون الأخرى، مثل الغرافيت، والمـــاس وكرات بكي. ويعرض الشـــكل (7 - 5) في (ب) صورة فوتوغرافية للبروفيســـور إيجيما حاملا فيها نموذجا ليـــس مطابقا للمقاييس الحقيقية لأنبوبة الكربون التي تكاد ترى تحت الميكروسكوبات الإلكترونية النافذة فائقة التكبير، كان قد جمعه بنفســـه ليعرض عليه، خلال أحد المؤتمرات الدوليـــة، كيف تترابط ذرات الكربون في سلاسل طولية ممتدة لتكون أنبوبة الكربون النانونية.



الشكل (7 - 5): (أ) رسم تخطيطي من تصميم مؤلف هذا الكتاب يوضح شكل أنبوبة من أنابيب الكربون النانونية، التي لا يتعدى مقياس بعد قطرها 1.4 نانومتر. ويبين الشكل أيضا ذرات الكربون، التي ينتج عن ترابطها التساهمي بعضها ببعض تأليف هيكل الأنبوبة. ويعرض الشكل في (ب) صورة فوتوغرافية للبروفيسور إيجيما، أخذت له وهو يحمل بين يديه نموذجا مكبرا عشرات الآلاف من المرات لأنبوبة الكربون النانوية التي اكتشفها في العام 1991 (1).

كيف تم الاكتشاف؟

يروي البروفيسور إيجيما، أنه كان متعلقا ومغرما بكريات بكي، ليس فقط بسبب جمال مطلعها عند فحصها وتعيين بنيتها تحت الميكروسكوبات الإلكترونية النافذة، ولكن نظرا إلى أنها تمثل مستقبل صناعة الحواسب والأجهزة الإلكترونية. لذا، وهو الباحث بشركة NEC إحدى أهم شركات صناعة الإلكترونيات في العالم، فقد انجرف نحو

دراســة البكي بول، حيث كثف أنشــطته البحثيه حول تطويرها وتحسين خواصها وسماتها، وذلك منذ أن أعلن فريق العمل البحثي بجامعة رايس الأمريكية اكتشافهم لها.

وفــي إحدى المرات التي قام فيهــا إيجيما بتخليق تلك الكريات، وفي أثناء فحصه لها تحت الميكروســكوب النافذ الإلكترونــي، لاحظ وجودها مختلطة مع جســيمات نانوية أســطوانية الشــكل لا تتعدى أقطــار مقاطعها الدائرية 1.4 نانومتر، برزت تحت الميكروســكوب وكأنها أنابيب مفرغة! وقد لفتت تلك الجســيمات ببنية هياكلها الفريدة المؤلفة مــن مئات الآلاف من ذرات الكربون المرتبطــة، وامتــداد أطوالها إلى عــدة مئات من النانومتــرات، انتباه إيجيما، فاســتوقفته ونحته عن فحص ما أمامه من كريات بكي. ومن هنا بدأت قصة الاكتشاف، الذي لم يفصح عنه إيجيما إلا بعد التأكد مرات ومرات من صحته، حيث قام بتحضير عشرات العينات الأخرى بنفس طريقة التحضير المستخدمة في العينة الأولى، الذي أثبتت صدق ما شاهده وصحة التجربة التي جعلت منه أشهر علماء القرن العشرين في مجال علم وتكنولوجيا النانو.

وأود هنا أن أطرح عدة تساؤلات: هل المصادفة وحدها هي المسؤولة عن تحقيق هذا الإنجاز العلمي غير المسبوق؟ ماذا لو قدر لتلك العينة أن تقع تحت عيني فاحص آخر غير إيجيما؟ هل كان سيصب تركيزه على تلك الأنابيب معتبرا إياها جسيمات غريبة تلوثت بها العينة؟ ومن يدري، فلربما كانت هذه الأنابيب الفريدة تقع أمام عيون فاحصين وعلماء آخرين قبل إيجيما، لكنها لم تسترع انتباههم.

إذن، والكلام هنا إلى أبنائي الشــباب وزملائي من الباحثين العرب، ليس من العار مطلقا أن يكتشــف الباحث ظاهرة ما مــن قبيل المصادفة، فمعظم الاكتشــافات تمت على هذا النحو. ولعل نيوتن وتفاحته الشــهيرة أحد أبرز النمــاذج الدالة على هــذا - لكن الأمر غير المقبول هنــا، أن تتوافر لنا هذه «المصادفــة» من دون أن تســترعي ملاحظتنا وانتباهنــا. ولربما تكون قصة اكتشــاف أنابيب الكربون من الأمثلة الجيدة التي توضح كيف يستغل الباحث ما يراه، وكيف يسخر كل علمه المكتسب في تبرير سبب وقوع هذه المصادفة. وتماما مثلما فعل إيجيما وفريقه البحثي، فقد كانت تبريراتهم العلمية منطقية، تســتند إلى أسس وأركان العلوم الأساســية، وهو ما جعل الوسط العلمي في العالم أجمع مطمئنا إلى تلك النتائج، ومصدقا لهذا الإنجاز العلمي الكبير.

أنواع أنابيب الكربون النانوية

تُحضَّر أنابيب الكربون النانوية بواسطة عدة طرق. من بينها:

- طريقة التفريغ القوسي Arc Discharger، وهي الطريقة التي استخدمها إيجيما في تحضير عينته الأولى لتلك الأنابيب.
- طريقة ترسيب الأبخرة الكيميائية Chemical Vapor Deposition (CVD).
- التذرية بواسطة أشعة الليزر Laser Ablation.

ويبذل الباحثون والعلماء منذ فترة، جهدا مضاعفا من أجل التوصل إلى طرق إنتاجية أخرى، أقل تكلفة وأكثر إنتاجية لتسد حاجة السوق العالمية من هذه المنتجات النانوية، التي ما زالت أسعارها مرتفعة.

ورجوعا إلى عدد الجدران التي تتألف منها الأنبوبة الواحدة، يمكن تصنيف أنابيب الكربون النانوية المنتجة إلى فئتين هما: أنابيب أحادية الجدران Single-walled Nanotubes (SWNT) وأنابيب متعددة الجدران Multi-walled Nanotubes (MWNT).

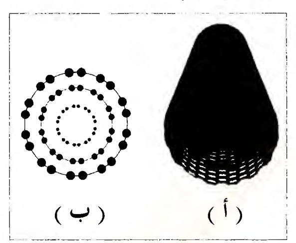
الأنابيب أحادية الجدران

يوضح الشكل (7 - 5) في (أ) رسما تخطيطيا لأنبوبة الكربون أحادية الجدران، وهي النوع الأكثر شهرة من الأنابيب. وإذا تأملنا جيدا ذلك الشكل، سوف نستنتج أن تلك الأنابيب الفردية يمكن تخيلها على أنها صفائح طولية من الغرافيت، ملفوفة على هيئة أسطوانات مصمتة، ينتهي طرفاها بنصفي كرة من كرات بكي، ولذلك يطلق عليها أحيانا، اسم أنابيب بكي Buckytube، وحيث إن النسبة بين طول وقطر هذه الأنابيب كبيرة للغاية، حيث تصل قيمتها إلى مليون، فإنه يمكننا تجاهل قيمة تلك الأقطار لضآلتها، وأن نعبر عن هذه الأنابيب ببعد واحد فقط One-dimensional Structure وهو الطول، الذي قد يمتد ليصل إلى 50 ألف نانومتر.

الأنابيب متعددة الجدران

يوضح الشكل (7 - 6 «أ») رسما تخطيطيا لأنبوبة من الأنابيب النانوية المتعددة الجدران، المؤلفة من مجموعة متداخلة من أنابيب أحادية الجدران لها أقطار مختلفة لكنها تشترك في مركز واحد (7 - 6 «ب»). وتختلف

أطـوال وأقطار بنية هذا التركيب عن نظيره في الأنابيب أحادية الجدران اختلافا بينا مما يؤثـر بطبيعة الحال في خواصها التي تختلف تماما عن خواص الأنابيب أحادية الجدران.



الشـكل (7 - 6): (أ) رسـم تخطيطي يوضح شـكل أنبوبة من الأنابيب المتعددة الأقطـار، المؤلفة من مجموعة من الأنابيب المتداخلة. وعند مشـاهدة هذه الأنابيب من مسـقط أمامي، نلاحظ أنها عبارة عن عدة دوائر مختلفة الأقطار ومتحدة في المركز، كما هو موضح في (ب) [1].

الخواص

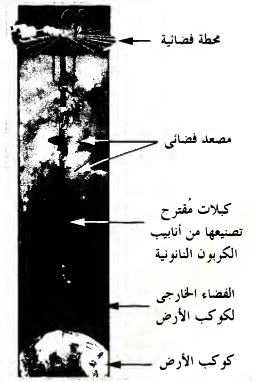
بعدما أفردنا تلك المسـاحة العريضة، التـي وصفنا من خلالها البنية التركيبية لأنابيب الكربون النانوية، من المنطقي أن يتساءل القارئ الكريم، ومعـه كل الحـق في ذلك، عـن ماهية أمارات «الحسـن» فـي الصفات و«الكمال» في الخواص التي تتمتع بها تلك الأنابيب النانوية، والتي جذبت إلى «مملكتها» أكثر من ستة آلاف باحث من مختلف بقاع العالم؟

كان لارتفاع قيم «قوة أو مقاومة الشد» (Tensile Strength) [13] التي تتمتع بها تلك الأنابيب، أبلغ الأثر في جذب انتباه الأوساط العلمية بمختلف تخصصاتها، والصناعية على حد سـواء. وقد تم تعيين مقدار مقاومة الشد لأنابيب الكربون النانونية بواسطة ميكروسكوب القوة الذرية، ووجد أنها تساوي 100 ضعف قيمة مقاومة أقصى أنواع الصلب لإجهادات الشد! وذلك على الرغم من خفة أوزانها، حيث تتدنى كثافتها إلى سدس - $\frac{1}{6}$ - قيمة كثافة الصلب.

ولم يكن من الغريب أن تعمد وكالة ناسا NASA [14] إلى تنفيذ مشروع برنامج بحثي ضخم، اشـــترك فيه 50 عالما متميـــزا ينتمون إلى 20 مركزا بحثيا، بهدف دراســـة مدى إمكانية اســـتخدام أنابيب الكربون النانوية في صنع كابلات Cables قوية لمصاعد فضائية Space Elevators، تكون قادرة علـــى الربط بين المحطات الأرضية ومحطات الفضاء الخارجي، وذلك وفقا للرسم التخيلي الموضح بالشكل (7 - 7). وانتهى تقرير المرحلة الأخيرة من المشـــروع [15] إلى التوصية في أن فكرة تصنيع كابلات من أنابيب الكربون قائمة وممكنة، شريطة استمرار الجهود نحو تحقيق ذلك الهدف، الذي تبلغ تكلفته المتوقعة نحو 10 مليارات دولار. وقد أوضحوا في تقريرهم، أن المدة الزمنية المطلوبة لتنفيذ ذلك المصعد الفضائي، يتوقع ألا تزيد على 15 عاما، وذلك بدلا من 300 عام، كما أفادت بذلك دراســـة سابقة قد أجريت لنفس الهدف، لكن قبل اكتشاف الأنابيب الكربونية، نانوية الأقطار.

وعلى الرغم من تساوي مقدار قيمة صلادة Hardness هذه الأنابيب مع الماس [16] - أصلد مادة معروفة للإنسان - فإن أنابيب الكربون النانوية مرنة Elastic، حيث تبدي مقاومة فائقة ضد التشوه والكسر إذا ما عُرِّضت لأعلى قيـــم من إجهادات الثني والانحناء Bending Stresses، متفوقة في ذلك على جميـــع فئات المواد المرنـــة Elastic Materials المعروفة، وتفوق قيمة مقاومة الصلب للانحناء بنحو خمســـة أضعاف. وقـــد وفرت تلك المرونة Elasticity العالية، التي تتســـم بها أنابيب الكربون، قدرة فائقة على اســـتعادة شـــكلها الطبيعي بعد زوال أي إجهادات قد تؤثر فيها، وذلك دون أن تبدي أدنى تغير أو تشوه مصاحب، وكأنها قطعة من المطاط المعروف بمرونته العالية.

وبالإضافـــة إلى تلك الخواص الميكانيكـــة الفريدة التي تتمتع بها أنابيب الكربـــون النانونية، فهـــي أيضا تتمتع بعدد ضخم من الخـــواص الفيزيائية والكيميائية الفريدة. وتأتي قدرة تلك الأنابيب على الموصلية الكهربية، أحد أهم الخواص الفيزيائية التي تتمتع بها، حيث تتضاعف في قيمتها عن قيمة فلـــز النحاس بنحو 1000 مرة [17]. وأضف إلى ذلك، قدرتها غير المعهودة بأي مادة على التوصيل الحراري Thermal Conductivity، الذي تتســـامى قيمته لتزيد بنحو عشرة أضعاف على ما هي عليه بفلز الفضة [18].



الشكل (7-7): تصميم افتراضي يبين نموذج مصعد الفضاء، مكون من مركبتين، المقترح إنشاؤه ليربط بين المحطات الأرضية على سطح كوكب الأرض بنظيرتها الفضائية. ويوضح الشكل كابلات مصنوعة من أنابيب الكربون النانوية المسؤولة في حمله والصعود به إلى المحطات الخارجية، أو الهبوط إلى المحطات الأرضية على سطح كوكب الأرض. (الصورة منقولة من المرجع 15 مع بعض التصرف من قبل مؤلف هذا الكتاب في إضافة الشرح على الشكل)

التطبيقات الفعلية والمتوقعة

إن الخواص التي تتمتع بها أنابيب الكربون النانونية، مع وجود عدة مئات من الأبحاث العلمية المنشورة في أعرق الدوريات العلمية، قد تُصعِّب مهمة مؤلف أي كتاب في أن يحصر التطبيقات الخاصة بهذه الفئة الفريدة من المواد النانوية. وقد رأيت أن أعرض ملخصا لبعض هذه التطبيقات، الحالي منها أو المرتقب، وذلك من خلال النقاط التالية:

○ **تخزين الطاقة Energy Storage**

- صناعة خلايا الوقود Fuel Cells.
- تخزين الطاقة الشمسية Solar Storage.
- صناعة أوعية لتخزين الهيدروجين Hydrogen Storage Containers.
- صناعة بطاريات الليثيوم Lithium Batteries.
- صناعة المكثفات الكهروكيميائية فائقة السعة Electrochemical Supercapacitors.

○ **الإلكترونيات Electronics**

- أجهزة الانبعاث الحقلي Field Emitting Devices.
- الترانزستورات Transistors.
- المجسات النانوية والحساسات Nanoprobes and Sensors.
- الحساسات الكيميائية Chemical Sensors.
- شاشات العرض المسطحة Flat Panel Display Screens.
- أجهزة النظم الكهربائية والميكانيكية الميكرومترية Microelectro Mechanical Systems (MEMS).

هذا وتوظف أنابيب الكربون النانوية في عدة مجالات أخرى، من بينها:

- دعم وتقوية المواد المتراكبة Composite Reinforcements.
- صناعة فلاتر (مرشحات) تنقية المياه Water Filters.
- صناعة الأغشية Membranes المستخدمة في عمليات تحلية المياه Water Desalinations.
- تدوير المخلفات Waste Recycling.
- توصيل الدواء (إلى داخل جسم الإنسان) Drug Delivery.



8

أمثلة لنانويات أخرى

«إن المصادفة، المبنية على قاعدة متينة من الأسس العلمية، والممزوجة بالإصرار والكفاح، من شأنها أن تؤدي إلى اكتشافات علمية فريدة غير متوقعة»

المؤلف

استفضنا في الفصل السابق في الحديث عن الصور المختلفة لعنصر الكربون ومواده النانوية، التي اكتُشفت خلال العقود الثلاثة الأخيرة، وذلك نظرا إلى الأهمية التكنولوجية القصوى التي تمثلها تلك المواد.

ولكن، هل هذا فقط ما تمتلكه خزائن تكنولوجيا النانو من مواد مبتكرة وفريدة؟ بالطبع لا، عزيزي القارئ، فكما تعلم، هناك العشرات والعشرات من «النانويات» الفريدة التي اكتُشفت خلال الفترة نفسها المواكبة لاكتشاف صور الكربون النانوية المتقدمة. وما زالت روائع الإبداعات البحثية النانوية، تهدي البشرية موادها الجديدة بصورة شبه يومية. وقد رأيت قبل أن ننتقل معا إلى أعتاب الباب الثالث

الخاص بنمـــاذج للتطبيقات الواعدة لتكنولوجيـــا النانو، أن أعرض خلال صفحات هذا الفصل من الكتاب بعضا من المواد النانوية الفريدة، بصفاتها المتميزة واستخداماتها المهمة، الحالية والمرتقبة.

● المحفزات الضوئية النانوية

ليـــس بخافٍ عـــن القارئ الكريم، أنـــه منذ بداية هـــذا القرن، ارتبط مصطلـــح الحفـــز الضوئـــي Photocatalysis ارتباطا وثيقـــا بتكنولوجيا النانـــو، الأمر الذي نتـــج عنه ميلاد عدد من المخرجـــات المبتكرة المعروفة باســـم المحفزات الضوئيـــة النانويـــة Nano Photocatalysts، والتي تلقى منذ ســـنوات قليلـــة، رواجا وإقبالا منقطعي النظيـــر. وفي الآونة الأخيرة أيضـــا، ونتيجة لنجاح تكنولوجيـــا النانو في إنتاج تلـــك الفئة المتميزة من المواد المتعددة الاســـتخدامات والتطبيقات Multifunctional Materials، أضحى كثير من المصطلحات الفنية والتقنية المرتبطة بعمل وأداء تلك المواد النانوية المتقدمة، كلمات شائعة وتعبيرات متداولة بين أفراد الأسرة.

فمن منا لم يسمع عن كريمات ودهانات البشرة الحاجبة Sun Blocker للأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس للوقاية من تأثيراتها الضارة؟ مـــن منا لم يتابع حمـــلات الدعاية والترويج الخاصـــة لكثير من المنتجات الكهربية مثل الثلاجات، ذات الأســـطح الداخلية المُغطاة بطبقة رقيقة من تلـــك المحفزات الضوئية التي تعمل كمضـــادات للبكتيريا Anti-bacterial والفطريات Anti-fungicidal لمنعهما من الانتشار بداخلها؟

وكثيرا ما نســـمع ونشاهد اليوم، تقارير عن توافر أجهزة تكييف مزودة بفلاتر هوائية خاصة، قادرة على التخلص من البكتريا العالقة بجو الغرف المُغلقة وتنقيته من العوالق الدقيقة التي تضر جسم الإنسان عند استنشاقها. ونشـــاهد كذلك في الأســـواق كثيرا مـــن الأجهزة التـــي تُوظف المحفزات الضوئيـــة النانوية لتنقية الوســـط الهوائي الداخـــل للمنازل، وتخليصه من الروائح الكريهة Deodorizing. هذا إلى جانب توافر فلاتر مياه لها القدرة علـــى تصفية وتنقية مياه الشـــرب داخل المنزل من العوالـــق والملوثات، إلى جانب تخليصها من العوالق البكتيرية والفطرية التي قد توجد بها.

وفي قطاع المباني والعمارة، أصبح استخدام ألواح زجاجية مُغطاة بطبقة رقيقة شفافة من حبيبات المحفزات الضوئية، كواجهات للبنايات، أمرا مألوفا، حيث تحافظ تلك المحفزات على نظافة تلك الأسطح بصورة دائمة، وتحول دون ترسب أي عوالق أو ملوثات هيدروكربونية عليها، لذا فهي تضمن ما يُعرف الآن بمصطلح التنظيف الذاتي Self-cleaning. كل هذه المُنتجات وغيرها، متوافر الآن بشكل واسع في كل الأسواق العالمية، وعلى الأخص في أسواق منطقتنا العربية، المعروفة بقدرتها الاستيعابية والاستهلاكية الضخمة للمنتجات التكنولوجية المتقدمة، ولاسيما منتجات تكنولوجيا النانو التي أصبحت ملء السمع والبصر.

- **حبيبات ثاني أكسيد التيتانيوم**

ترجع معرفة العالم بمادة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 إلى عهد بعيد، حيث كانت وما زالت مساحيقه الناعمة تستخدم في صناعة مواد الأصباغ والطلاء. وترجع أسباب استخدام هذه المادة خلال تلك الفترة الزمنية الطويلة لرخصها وثباتها الكيميائي، علاوة على أنها مادة صديقة للإنسان والبيئة. وعلى الرغم من هذا الثبات الكيميائي العالي لمادة TiO_2، فإنه عند تعرضها لمصدر من مصادر الضوء، مثل الأشعة فوق البنفسجية، يزداد نشاطه الكيميائي بشكل كبير ومُلاحظ. وقد عُرفت تلك الخاصية الكيميائية منذ نحو 80 سنة، حين لوُحظ «تَقَشُّر Flaking» في طبقة الحوائط المطلية بدهان TiO_2، وذلك عند تعرضها لأشعة الشمس [1]، التي تُسبب أيضا تغيرا في ألوان الأقمشة التي تدخل بصبغتها مادة TiO_2.

ومنذ مطلع القرن الماضي، كثّف العلماء والباحثون من مختلف المدارس العلمية في العالم دراستهم بشأن هذه الظاهرة التي تُعرف باسم النشاط الضوئي Photoactivity، حيث أظهرت نتائج تلك الدراسات المستفيضة التي خضعت لها حبيبات TiO_2، بأنها مادة لها قدرة عالية على الامتصاص والتشبع بأشعة الشمس فوق البنفسجية، وهذا يؤدي إلى تولد ذرات من الأكسجين على سطح تلك الحبيبات. وقد عزا العلماء سبب «النصاعة الظاهرية» التي تبديها الصبغات والدهانات المؤلفة من تلك الحبيبات، إلى

خاصية فريدة تتمتع بها هذه المادة، تُعرف باســم «القصارة أو الابيضاض الضوئــي Photobleaching». وهذه الخاصية ليســت محصورة فقط في حبيبات TiO_2 النانوية، لكنها موجودة في أكاسيد نانوية أخرى، وإن اختلف مقدارها وشدتها، مثل أكسيد الزنك ZnO.

• **ظاهرة الحفز الضوئي**

وجــدت أن أتحدث فــي البداية عن الكيفية والأســباب المؤدية إلى أن تسلك حبيبات أكســيد التيتانيوم TiO_2 هذا السلوك عند تعرضها لأشعة قادمــة من مصدر ضوئي معين مثل أشــعة الشــمس فوق البنفســجية. كلنــا نتذكر ميكانيكية امتصــاص الضوء في المواد من أشــباه الموصلات Semiconductors النقية، مثل السيليكون والجرمانيوم، والتي إذا ما عُرضت إلكتروناتها الواقعة في نطاق التكافؤ الخارجي Valance Band لذرات تلك المواد، إلى مصدر ضوئي - طاقة ضوئية، تُسمى طاقة الفوتونات Photon energy - يعمــل ذلك على إثارتها و«تمردها» على البقاء والاســتمرار في هــذا النطاق من الذرة، وذلك كنتيجة لاكتســابها تلك الطاقة. وتتبع ذرات المحفزات الضوئية النانوية، مثل TiO_2، الميكانيكية نفســها، فقد أكسبتها مقاييس أبعاده النانوية الصغيرة جدا خواص المواد من أشــباه الموصلات، على الرغم من كونها أكاسيد فلزية.

وعند اكتســاب هــذه الإلكترونات طاقــة عالية، تفوق فــي قيمتها مقــدار قيمة الطاقة التــي تربطها بنواة الذرة، فإنها تتحرر، متســامية علــى مدارهــا، لترتقي إلــى نطاق آخر يُعرف باســم نطــاق التوصيل Conduction Band، الذي يفصله عن النطاق الأول فجوة، تُعرف باسم فجوة النطاق Band Gap. وخلاصة القول هنا، إن الإلكترونات المهاجرة مــن مداراتها الخارجية الواقعة في نطاق التكافؤ، تكتســب طاقة عالية تســمى Band-gap Energy، تكون كالجسر الرابط بين نطاقي التكافؤ والتوصيــل، والتي بها تتمكن الإلكترونــات الخارجية من عبور الفجوة. وحيث إن الإلكترونات بالذرة تحمل شــحنات سالبة، فإنها حينما تغادر مواقعهــا بنطاق التكافــؤ، تحمل معها تلك الشــحنات، تاركة من ورائها

فراغات موجبة الشـحنات. ولكن سـرعان ما تنجذب تلك الإلكترونات سـالبة الشـحنات، نحو مواقعها الأصلية (الفراغات الحاملة لشحنات موجبة) فتعود إليهـا وتحتلها. ولكنها لا تكاد تتأثر ثانية بفوتونات ضوء الشـمس - طاقة ضوئية - حتى تترك مواقعها مرة أخرى، لتنطلق إلى نطـاق التوصيل. وهكذا تكون الإلكترونات فـي حركة دائبة داخل بلورة المواد من أشباه الموصلات، ليتولد بذلك جهد كهربي بينها وبين الفجوات موجبة الشـحنات، وعلى أساس ذلك الجهد يسـير التيار الكهربي، بين القطبين - السالب والموجب.

• **التنظيف الذاتي للأسطح**

قبيل نهاية تسـعينيات القرن الماضي، أجـرى فريق عمل بإحدى الجامعـات اليابانيـة تجربة مهمـة بهدف التحقق مـن مدى فاعلية طبقات TiO_2 المؤلفة من حبيبات نانوية، على إذابة الملوثات العضوية من على سـطح المواد [2]. وقـد أجرى الفريق تجربـة رائدة، والتي فيها رُسِّـبت طبقة من حمض الإستيريك (مادة عضوية)، بلغ سُمكها نحو 2 نانومتر، وذلك فوق سـطح بلورة أحادية من مادة TiO_2. وقام الفريق بعد ذلك بحسـاب عدد الجزيئات من حمض الإستيريك التي تُغطي المساحة السطحية لمادة TiO_2. وقد وجدوا أن السنتيمتر المربع الواحد مـن TiO_2 يغطيه نحو 10^{16} جزيء من حمض الإسـتيريك. ثم قاموا بعد ذلك بتعريض هذه الطبقة العضوية المترسـبة لفوتونات ضوئيـة صادرة عن مصدر لتوليد الأشـعة فوق البنفسـجية، وذلك لفترات زمنية مُختلفة. وبعد كل فترة زمنية، لاحظ الفريق أن سُـمك الطبقـة يتناقص تدريجيا مع زيادة المُدة الزمنية المخصصة لتعريضه للفوتونـات الضوئيـة، إلى أن تلاشـت الطبقة تمامـا بعد تعريضها للمصـدر الضوئي لمدة 20 دقيقـة. وقد اسـتنتج الباحثون من تلك التجربة، قدرة مادة ثاني أكسـيد التيتانيوم (TiO_2) على تحليل مادة حمض الإستيريك العضوية، المترسبة على السطح وتحويلها إلى بخار ماء وثاني أكسيد الكربون.

وقد أثارت هذه التجربة، وما تلاها من سلسلة تجارب للفريق ولفرق بحثية أخرى من جميع المدارس البحثية في العالم، جدلا كبيرا، حيث أكدت نتائج كل تلك التجارب مدى فاعلية المحفزات الضوئية النانوية لمادة TiO_2 في مجال تغطية ووقاية الأسطح من تراكم الملوثات والعوالق العضوية الموجودة بالأوساط البيئية المختلفة. وأرجعت النتائج تلك الخاصية التي تتمتع بها مادة TiO_2 إلى أن تعرض المادة لذلك المصدر الضوئي يؤدي إلى تكون فجوات موجبة الشحنات في بلوراتها، ما يخلق بيئة مؤكسدة قوية، من شأنها تحليل المواد العضوية وتحويلها إلى مركبات هيدروكربونية صديقة للبيئة. ومنذ ذلك الحين سُميت هذه العملية باسم التنظيف الذاتي للأسطح Self-Cleaning.

وقد أوحت تلك القدرة المتميزة التي تتمتع بها حبيبات مادة TiO_2 النانوية، لفريق بحثي ياباني بالتعاون مع هيئة الطرق السريعة هناك وذلك لتنفيذ مشروع بحثي مشترك، قام فيه الفريق بطلاء أغطية كشافات الإنارة لمصابيح الصوديوم، المستخدمة في إضاءة الأنفاق المنتشرة بشبكة الطرق السريعة هناك، بطبقة رقيقة شفافة من مادة TiO_2 النانوية، وذلك بغرض التنظيف الذاتي للأغطية الزجاجية لتلك الكشافات [3]. وقد بُنيت الفكرة على أساس أن مصابيح الصوديوم الموجودة داخل الكشافات تشع منها طاقة ضوئية قوية يمكنها الوصول بسهولة إلى الطبقة المُستخدمة في طلاء أغطية الكشافات. وبالفعل قد نجحت الفكرة، إذ تمكنت حبيبات مادة TiO_2 النانوية من حماية أسطح أغطية الكشافات الخارجية مع الترسيبات الهيدروكربونية الناتجة عن سوء التهوية داخل تلك الأنفاق بالطرق السريعة التي تستوعب يوميا كثافة مرورية عالية.

ويوضح الشكل (8 - 1) صورة لموقع النفق (الشكل 8 - 1 «أ») التُقطت بغرض إبراز تأثير طلاء أغطية كشافات الصوديوم بطبقة رقيقة شفافة من مادة TiO_2 النانوية، في عتامة أو نقاوة أغطية الكشافات بعد تشغيل مصابيح الصوديوم المستخدمة في إضاءة النفق. ويتضح من هذا الشكل، أنه على الرغم من تشغيل النفق لأشهر عدة، تحت ظروف الكثافة المرورية

العالية نفســها التي يعانيها، فإنه مع اســتخدام طبقة من TiO_2، حافظت أغطية كشــافات الصوديوم على درجة نقاوتها (الشكل 8 - 1 «ب»)، الأمر الذي أدى إلى المحافظة على مستوى الإنارة المطلوب توافره داخل النفق.

ويعقــد الشــكلان (8 - 1 «جــ») و(8 - 1 «د») مُقارنة أجريت للغرض نفسه، على غطاء واحد من كشافات الإنارة طُلي بطبقة من TiO2 «جـ» بينما لم يطلَ الجزء الآخر «د». وبعد تشغيل الإضاءة عدة أشهر، اتضح أن الجزء الــذي لم يضأ، قــد تراكمت عليه ترســيبات هيدروكربونية كثيفة، فأصبح معتما، هذا على النقيض من الجزء الآخر. هذا ويمثل الشــكل (8 - 1 «د») صورة لأحد أغطية كشــافات الإنارة المضاءة لأشــهر عــدة، والتي لم تُغطَ بطبقة TiO_2 النانوية، أُخذت كصورة مرجعية تُســتخدم للمقارنة بين نقاوة أسطح الكشافات المُضاءة، قبل وبعد عملية الطلاء.

- **مكافحة البكتيريا والتلوث الميكروبي**

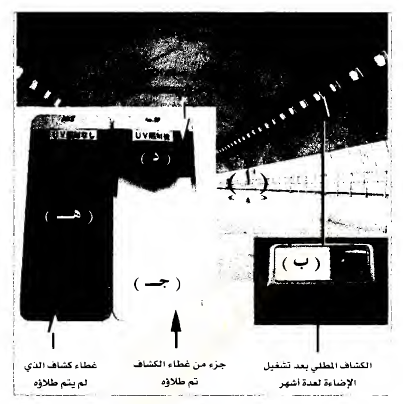
ومع تزايد الأنشــطة البحثية والتطبيقية المُكثفة التي أجرتها كثير من الأكاديميات ومراكز البحوث في العالم على حبيبات ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2، أكــدت مُخرجــات البحــوث العلمية أن قدرة المحفــزات الضوئية النانويــة، مثل TiO_2، الفائقة على تحليل المــواد والمركبات العضوية يمكن تطبيقها في مجال الكائنات المجهريــة Microorganisms. وقد أوضحت التجــارب التي أُجريت لمعرفــة تأثير حبيبــات TiO_2 النانوية في الخلايا المعروفة باســم الإيشيرشــيا كولي المعوية (Escherichia Coli (E. Coli، وقدرة تلك الحبيبات على القضاء نهائيا على تلك الخلايا البكتيرية، وذلك من خلال تعريضها لمدة أســبوع واحد لمصدر إشــعاعي من الأشــعة فوق البنفسجية، وبكثافة بسيطة لا يزيد مقدارها على $1mW/cm_2$ [(4)].

وفي دراســة أخرى، أظهرت النتائج أن القضاء على نشاط خلايا الإيشيرشيا كولي المعوية، يمكن أن يتم تنشيطه بصورة أقوى وفي حيز زمني أقل، إذا مــا غُلفت حبيبات TiO_2 النانوية بأغطية نانوية رفيعة الســمك، مخلقة مــن فلزي النحاس أو الفضــة [(5)]. وقد أكدت نتائج هــذه الدراســة، أن وجود تلك الطبقات الفلزية الرفيعة على أســطح

حبيبــات TiO_2، يضاعــف من قدرتها في القضــاء على تلك الخلايا الجرثومية، حتى في عدم وجود الأشــعة فوق البنفســجية، والاكتفاء فقط بتوفير مصباح إضاءة من الفلوريسنت [5] كمصدر إضاءة ضعيف لتوليد الفوتونات الضوئية التي تحتاج إليها المحفزات الضوئية النانوية لأداء وظائفها.

وتجدر الإشــارة إلى النتائج العلمية المهمة التي وفرتها دراســة حديثة أُجريــت في العام 2009[6] بهدف التعــرف على قدرة المحفزات الضوئية النانويــة لمادة TiO_2 على قتل الفيروســات العالقة بالأجــواء المُغلقة، مثل مراكز التســوق، المكاتب، دور الســينما والمســرح، التي تزداد فيها أنشطة الفيروســات التي تصيب الجهاز التنفســي للإنســان. وقــد خلُصت تلك الدراســة المهمة إلى توفير عوامل الحماية الصحية والبيئية اللازمة لرواد تلك الأماكن، وذلك عن طريق استخدام أنواع مُبتكرة من مُنقيات الجو التي تدخل مادة TiO_2 في تصنيعها، والتي من شأنها أن تقضي نهائيا على هذه الفئة من الفيروســات الخطيرة التي قد يكون من بينها الفيروس المعروف باسم إنفلونزا الخنازير (H1N1) Swine Flu.

ومنذ أن نُكب العالم في الســنة الماضية بتفشــي H1N1، واتساع رقعــة الإصابة به في أماكن متعددة في العالم، تنافســت الشــركات العالمية المتخصصة في إنتاج أجهزة مُنقيات الجو والفلاتر، في توظيف حبيبات وطلاءات مادة TiO_2 النانوية وإدخالها في صناعة منتجاتها. ولا أدري، فلربمــا صدقت تلــك النتائج البحثية التــي تؤكدها الفرق البحثيــة التابعة لتلك الشــركات المُجراة، بقــدرة منتجاتها على دحر هذا النوع الجديد من الفيروســات من خلال تصفية الهواء وترشيحه بمصاف خاصة، غُطيت تغطية أسطحها بحبيبات بتلك المادة. هذا في الحين الذي تؤكد فيه دراســة أخرى، أجرتها إحدى الشركات اليابانية المتخصصة في إنتاج الملابس، أنها قد توصلت إلى إنتاج أقنعة Masks خاصة، تترسب على ألياف أنسجتها طلاءات نانوية من حبيبات TiO_2، لهــا القدرة على قتل فيروس H1N1 ومنعه من التســلل والدخول إلى الجهاز التنفسي [7].



الشكل (8 - 1): (أ) جسم النفق وقت تشغيل إنارة كشافاته بعد أشهر عدة من طلاء أغطيتها بطبقة شفافة مكونة من حبيبات TiO_2 النانوية. (ب) صورة لأحد الكشافات الموجودة في (أ). (جـ) جزء من غطاء كشاف طلي، (د) جزء للكشاف نفسه الموضح في (جـ) لم يتم طلاؤه، (هـ) غطاء كشاف إنارة - لم يُطل بالكامل - بعد تشغيله فترة طويلة امتدت أشهرا عدة. (الصورة منقولة من المرجع 3 مع تصرف مؤلف هذا الكتاب في إضافة الشرح والتعليق على الصور المبينة).

وفي ظل ما توفره الخواص الكهروضوئية الفريدة التي تتمتع بها حبيبات TiO_2 النانوية، فقد وُظفت في أعمال دهان وطلاء جدران غرف العمليات الجراحية، وغرف المرضى بالمستشفيات، حيث أثبتت التجارب الميدانية التي أُجريت، قدرة تلك الحبيبات في التعامل مع مختلف أنواع البكتيريا، الميكروبات وبعض الفيروسات - باعتبارها مواد عضوية - التي قد تتراكم على أسطح تلك الجدران، في القضاء عليها.

- **أسطح نانوية مقاومة للبلل بالماء**

كما ذكرنا في الفصل السـابق من الكتـاب، أن المصادفة، المبنية على قاعدة متينة من الأسـس العلمية، والممزوجة بالإصرار والكفاح، من شأنها أن تؤدي إلى اكتشـافات علمية فريدة غير متوقعة. فمن الطريف أن يذكر هنا، أنه في أثناء إجراء بعـض الاختبارات الخاصة بتعيين الخواص التي تكتسبها أسطح المواد المُغطاة بطبقة نانوية من TiO_2 من أجل ترسيخ وفهم عملية التنظيف الذاتي لأسـطح هذه المواد، اكتشف العلماء ظاهرة فريدة أخرى لم تكن في حسـبانهم مطلقا! فهم لم يهدفوا إلى دراسة مدى قدرة قطـرات الماء على بلل Wettability سـطح المادة المُغطاة بطبقة من TiO_2 قبل وبعد التعرض لإشعاع الأشعة فوق البنفسجية.

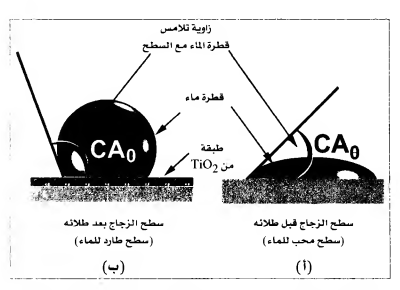
ومـن المعروف أنـه تقيّم قابلية سـطح مادة مـا للبلـل والتأثر بالماء Surface Wettability – حبه للمـاء Hydrophilic أو بغضه وكراهيته له Hydrophobic – بواسـطة قياس ما يسـمى زاوية تلامس قطرة من الماء Water Contact Angle (CAΘ) لسـطح مـادة ما. وكلما زادت قيمة هذه الزاوية كان السطح كارها لقطرات المياه وطاردا لها. وعلى النقيض، فكلما قلت قيمة تلك الزاوية، دل هذا على حب السطح لقطرات الماء بأن تلتصق وتتراكم عليه.

ولكي نتفهم هذه الظاهرة عمليا، فما علينا إلا أن نقارن بين حالتين: الأولـى، هي أن نقوم بسـكب مقدار من الماء على سـطح نظيف أملس ناعم، مصنوع من الزجاج مثلا، والثانية، هي أن نسـكب المقدار المتبقي من الماء على سـطح ورقة من الأوراق المستخدمة في لف الأطعمة عند إدخالها في أفران الطهو – تكون دائما مغطاة بطبقة شـمعية. وسـوف تمكننا تلك التجربة المهمة والبسـيطة، من مشاهدة الفرق بين الحالتين بوضوح تام. فبينما تميل قطرات الماء الموجودة على السـطح الزجاجي الأملـس في أن «تتفلطح» لتسـتقر على السـطح الزجاجي، تميل فيه نظيراتهـا من القطرات الموجودة على الورق المغطى بالطبقة الشـمعية في أن تتكور على هيئة كرات تسـهل إزاحتها من على السـطح، ومن ثم فهي كارهة للمياه.

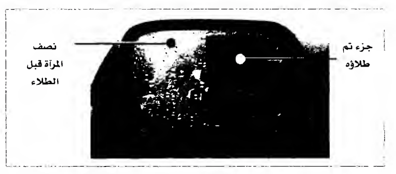
ونعـود ثانية إلـى المصادفة التي أدت إلى إظهـار صفة فريدة تتمتع بهـا مـادة TiO_2. فعند اسـتخدامها في تغطية سـطح جسـم ما، فإن قيمة - CAΘ المبدئية تمتد لعشـرات مـن الدرجات، وذلك اعتمادا على خشـونة وتضاريس سطح هذا الجسم. بيد أنه إذا ما تعرض سطح هذا الجسـم المُغطى بمادة TiO_2 إلى الأشـعة فوق البنفسـجية فإن قطرات الماء الموجودة على هذا السـطح تبدأ بأن تظهر انخفاضا كبيرا في قيمة الزاوية CAΘ ومن ثم تتولد عندها النزعة في أن تنتشـر انتشـارا أفقيا على السطح. هذا وقد حاولت كثير من الدراسات البحثية أن تفسر هذه الظاهرة غير المألوفة وأن تجيب عن الأساس العلمي لها [8، 9]. وتتلخص التفسـيرات العلمية التي انتهت إليها نتائج تلك الدراسات، في أن سطح الزجاج الخارجي، عند تعرضه لقطرات من الماء فهي تنتشر وتلتصق به، مكونة في ذلك قيم زاوية كبيرة تعبر عن اسـتقرارها على هذا السـطح المُحب لها. وفي حالة ترسـب طبقة لزجة من الملوثات العضوية الموجودة بالهواء الجوي على هذا السـطح، فإنها تتكور وتتراكم مجتمعة على هذا السطح الزجاجي ما يؤدي إلى إعاقة الرؤية من الداخل. وفور تغطية تلك الأسـطح الزجاجية، المُعرضة لمصدر الأشـعة فوق البنفسجية الآتية من الشمس، بمادة TiO_2 النانوية، فإن هذا يؤدي في البداية إلى تناقص في قيم زاوية تلامس القطرات لهذا الغطاء الموجود فوق السـطح الزجاجي، ما يحول دون استقرار القطرات على السطح، كما هو موضح في الشكل (8 – 2). أما إذا كان السـطح ملوثا بترسيبات هيدروكربونية، فإن طبقة TiO_2 تُحوّل تلك التجمعات الكروية إلى طبقة رفيعة السمك من الماء، لا تُعيق الرؤية.

وفـي الوقت الـذي يحمي فيه طلاء مادة TiO_2 الأسـطح الزجاجية للبنايات والمنشـآت من البلل وتراكم قطرات المياه عليها، فهي في الوقت نفسـه تقيها من التصاق حبيبات الأتربة والغبار بأسـطحها، وذلك عن طريق تحليل المواد العضوية اللزجة العالقة على أسـطح تلك الحبيبات – الأكسـدة عن طريق التحفيز الضوئي – ما يحول دون التصاقها بالسطح الزجاجي المُعالج.

وقد وظفت بعض من شـــركات إنتاج السيارات الكبرى في العالم مادة TiO_2 نانوية الحبيبات، في طلاء الأســـطح الزجاجية الخارجية للسيارات والمرايـــا الجانبية بها. وقد كانـــت النتائج مدهشـــة، إذ يوفر هذا الطلاء الشفاف غير المُعيق للرؤية في أثناء سير المركبة، وقاية دائمة لتلك الأسطح الزجاجيـــة من أن تتجمـــع عليها قطرات مياه الأمطـــار، كما أضاف إليها القدرة على تحليل جزيئات المواد الهيدروكربونية والتخلص منها. ويعرض الشـــكل (8 - 3) صورة مرآة جانبية، لإحدى الســـيارت في أثناء ســـيرها تحت هطول الأمطار، والتي قد طُلي نصف مســـاحتها بطبقة شـــفافة من مادة TiO_2 النانوية، بينما لم يُطل النصف الآخر بها. ومن الشـــكل نستنتج أن وجود هذه الطبقة على سطح المرآة قد منع تراكم قطرات المياه - التي تكـــون عادة محملة بملوثـــات عضوية - من الالتصاق بســـطحها، ما وفر وضوح الرؤية النموذجية لقائد المركبة.



الشـكل (8 - 2): رسـم تخطيطي يعقد مقارنة بين شـكل قطرة من الماء توجد على (أ) سـطح زجاجي أملس غير مغطى و(ب) السـطح نفسـه، ولكن بعد طلائه بطبقة رقيقة مؤلفة من حبيبات نانوية لمادة TiO_2. ومن الشـكل، نسـتطيع ملاحظة تدني قيمـة زاويـة التلامس بين قطرة الماء على السـطح غير المُغطـى (أ) مقارنة بقيمتها العالية بعد طلاء السطح بالمادة (ب) (10).



الشكل (8 - 3): صورة فوتوغرافية التقطت لمرآة جانبية، لإحدى السيارات إبّان سيرها في أثناء هطول الأمطار، طُلي نصفها بطبقة رقيقة شفافة من مادة TiO_2، بينما لم يُطل النصف الآخر، وذلك للمقارنة بين مدى وضوح الرؤية بالحالتين (11).

• **معالجة التربة**

كما ذكرنا مسبقا، فإن حبيبات مادة TiO_2 تُعد من أكثر المواد النانوية المتعددة الوظائف، إذ تُستخدم في مجالات عديدة، قد يصعب حصرها في فصل واحد من أي كتاب متخصص في تكنولوجيا النانو. وقد تمكن فريقٌ ياباني منذ فترة، في معالجة وتطهير مياه الصرف المتخلفة عن عمليات ري المحاصيل الزراعية، والتي تحتوي على مركبات عضوية متطايرة Volatile Organic Compounds، وذلك باستخدام المحفزات الضوئية النانوية لمادة TiO_2. وقد أرجع فريق العمل البحثي بهذا المشروع، أسباب نجاحهم إلى أن استخدام حبيبات نانوية من مساحيق TiO_2 فائقة النعومة،، قد أدى إلى سهولة انتشار تلك الحبيبات وتغطيتها مساحة كبيرة جدا من سطح التربة المُراد معالجتها. فقد كان للمساحة السطحية الكبيرة التي تتمتع بها تلك الحبيبات، الدور الأول في تجميع الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس، والتي أهلت تلك الحبيبات في أن تؤدي دورها بوصفها مؤكسدات قوية قادرة على تحليل الملوثات العضوية بالتربة وتحويلها إلى صور أخرى صديقة للبيئة (12).

وقد صمم هذا الفريق أيضا، نظاما مبتكرا يتألف من طبقات ورقية رقيقة مُغطاة بحبيبات نانوية من TiO_2، وذلك من أجل معالجة وتنقية التربة الملوثة بكلوريدات مركبات المواد العضوية. وقد قام الفريق البحثي

في بداية التجربة، بحرث التربة المُرادة معالجتها، وذلك بغرض إظهار لُبها للخارج وتعريضه لأشـعة الشمس. ثم غطّى الفريق بعد ذلك هذا السطح الداخلي مـن التربة بالأفرخ الورقية المُغطاة بحبيبـات TiO_2 والتي تُرش بحبيبات ناعمة من مسحوق الكربون المُنشط Activated Carbon. وأعقب ذلك، تسـخين التربة عن طريق خلطها بأكسـيد الكالسـيوم، ما أدى إلى تبخر المركبات العضوية المتطايرة الملُوثة للتربة، متحولة إلى غازات سرعان ما تمتصها حبيبات الكربون المنشـط الموجود على أسطح الأفرخ الورقية، وذلك بمجرد تصاعدها من التربة.

وتبـدأ عندئذ مهمـة حبيبات TiO_2 النانوية المُعرضة لضوء الشـمس – مصدر الأشعة فوق البنفسجية – والموجود أسفل حبيبات الكربون، في التعامل مع جزيئات الأبخرة العضوية التي امتصتها حبيبات الكربون، وأكسـدتها كي تتحول إلى صور مركبات عضوية بسيطة صديقة للبيئة [12].

• **الحبيبات الكمومية**

الحبيبات الكموميـة Quantum Dots، هي عبارة عـن بلورات نانوية Nanocrystals مـن مواد أشـباه موصـلات، تُحضّر معمليـا على هيئة جُسـيمات كُروية Nanoparticles Spherical ذات أبعاد ثلاثية (X, Y, Z) منتظمة أو شـبه منتظمة. وعلى الرغم من أن هـذه الكُريات، كما ذكرنا، تُحضر على صورة مركبات لأشـباه الموصلات مثل مركبات، CdS، CdSe، PbS، ZnS، CdTe، فإنـه كثيرا ما تكون على هيئة حبيبات نانوية لعناصر فلزية حـرة مثل الذهـب Au، الفضة Ag، البلاتـين Pt، الحديد Fe، أو حبيبات لسبائك فلزية مثل سبائك PtFe، CoPt3 وغيرهما.

• **نبذة تاريخية**

يرجـع الفضل في تحضير وتعيين خواص هذه الفئة المتقدمة من المواد النانوية لأشـباه الموصلات إلى عالم الكيمياء الشهير البروفيسور/ لويس بـروس Louis E. Brus – أسـتاذ الكيميـاء بجامعـة كولومبيا الأمريكية الذي انتقـل للعمل في معامل بل Bell Labs الشـهيرة بالولايات المتحدة

الأمريكية - حين نشـــر مقالا بحثيا في العام 1983 [13] أوضح فيه تأثير تصغير أبعاد حبيبات بلورات مركب CdS في تحسين الخواص الإلكترونية لها. ويواصل البروفيســـور بروس وفريق عمله حتـــى اليوم انفراداتهم في إثراء الأوســـاط العلمية لعلم النانو باكتشـــافاتهم المهمة المثيرة، إذ تمكنوا من استحداث وابتكار طرق واعدة، تمكنوا بها من تحضير عدد كبير كبير مـــن الحبيبات الكمومية لأشـــباه الموصلات. لذا فلم يكـــن غريبا أن ينال البروفيســـور بروس في العام الماضي 2008 جائزة Kavli Prize، مقدمة من الأكاديمية النرويجية للعلوم التابعة لوزارة التعليم والأبحاث النرويجية، وذلك مناصفة مع العالم الياباني الشـــهير سوميو إيجيما Sumio Iijima الـــذي يرجع إليه الفضل في تحضير أنابيـــب الكربون النانوية [14]، وذلك تقديرا لجهودهما المستمرة والناجحة وإبداعاتهما الخلّاقة في مجال علم وتكنولوجيا النانو.

● **الخواص**

يُتيح تناهي صغر مقاييـــس أقطار تلك البلورات النانوية (الحبيبات الكمومية)، التي تتراوح بين 2 و10 نانومترات، في أن تحصر داخل هذا الحيـــز الحجمي الصغير، عددا من الذرات يتراوح ما بين 10 و50 ذرة على الأكثر، لذا فهي تســـلك ســـلوك الذرة الأحادية Single Atom من المـــادة. وهذا التركيب غير المألوف للحبيبـــات الكمومية، وغير المتوافر في أي مواد نانوية أخرى، قد أهلها بأن تحتكر لنفســـها عددا كبيرا من الخواص الفريدة. وقد جذبت هذه المواد اهتمام الباحثين والعلماء منذ أن تعرفوا على بعض من خواصها البصرية غير المسبوقة. فقد وجدوا أنه بتعريضها لمصدر خارجي من الضوء، مثل الأشعة فوق البنفسجية، فإن ذراتهـــا تمتص هذا الضوء ثم تطلقه ولكن في صورة ألوان مختلفة عند أطوال موجية Wavelengths معينة. وقد اكتشفوا أيضا أن هذا الضوء المنبعث منها يعتمد اعتمادا كليا على مقاييس أقطار هذه الحبيبات إلى جانب اعتماده على هوية ونســـب العناصر الداخلـــة في تركيبها. ومن الطريـــف أن يذكر هنا، أن زيـــادة أبعاد أقطار تلك الحبيبات، تؤدي إلى

انبعاث اللون البنفسجي منها (نهاية الطول الموجي من ألوان الأطياف المرئية)، هذا في الوقت الذي تزداد فيه زُرقة هذه الحبيبات مع تناقص مقاييس أبعاد أقطارها.

● التطبيقات

أتاحت الخواص الفيزيائية والكيميائية الفريدة للحبيبات الكمومية أن تجد لها مجالات متنوعة وعديدة في كل الأفرع والقطاعات الصناعية، وعلى الأخص في صناعة الإلكترونيات وفي التطبيقات البيولوجية والطبية المختلفة.

● في المجالات الطبية

- تستخدم كواصمات فولورية Fluorescent Markers لتعيين أماكن وجود الأورام والخلايا السرطانية بالجسم، مهما تدنت مقاييس أبعاد تلك الأورام وصغر حجمها. وتختلف الألوان الظاهرة لتلك العلامات - الوصمات - المُحددة لأماكن وجود الأورام، باختلاف أبعاد أقطار الحبيبات الكمومية المُستخدمة. لذا، فهي تُعد الوسيلة الوحيدة ذات المصداقية العالية المستخدمة الآن للكشف المُبكر عن وجود السرطان في الجسم.

- يُقترح أن يتم تحمل تلك الحبيبات الكمومية بعقارات طبية ومواد كيميائية، بحيث توجه إلى الخلايا السرطانية بالجسم وتدحر موضعيا في مراقدها داخل أو بجوار الخلايا السليمة للجسم.

● في الصناعات الإلكترونية

إلى جانب توظيف الحبيبات الكمومية في كثير من أجهزة الألعاب الإلكترونية الحديثة، فهي أيضا تجد لها تطبيقات عريضة في المجالات التالية:

- تُستخدم في صناعة الديودات الباعثة للضوء LED، Light Emitting Diodes مثل المصباح الصغيرة الموجودة في الجانب السفلي من أجهزة التلفزيونات التي تظهر بلون أخضر عند تشغيل الجهاز، بينما تظل على لونها الأحمر عند غلق الجهاز ووضعه

في حالة الاستعداد للتشغيل. كذلك فهي تُستخدم في إضاءة اللمبات الصغيرة الموجودة أعلى أرقام أطوال الموجات المكتوبة بشاشة أجهزة المذياع والتي تضيء فور نجاح المُستخدم في استقبال موجة محطة إذاعية معينة.

- تُستخدم في الإضاءة الذاتية لعلامات التحذير المرورية وكذلك في لوحات الإعلانات الموجودة بالطرق السريعة، إذ تمتص تلك الحبيبات الكمومية ضوء كشافات السيارات لتضيء بألوان مختلفة، بناء على أبعاد أقطار الحبيبات المستخدمة في ذلك، والتي عادة ما تكون متباينة في الأبعاد حتى ينبعث منها الضوء بألوان مختلفة وجذابة.

- يقترح توظيفها في إضاءة الإشارات المرورية في الشوارع.

- تُستخدم في تطبيقات مشغلات أقراص الفيديو الرقمية، إذ تُصنع منها أشعة الليزر.

الأزرق Blue Laser المستخدم في قراءة بيانات تلك الأقراص.

- **في مجال الطاقة الجديدة والمتجددة**

- سوف تُوظف تلك الحبيبات الكمومية في تصنيع الجيل الثالث من الخلايا الشمسية الفوتوفولطية Photovoltaic Cells وذلك لكفاءتها الفائقة في توليد الطاقة بنسب تتجاوز حاجز 60 في المائة. وهذه النسبة إذا ما قُورنت بنسبة كفاءة مادة السيليكون التقليدية المستخدم للغرض نفسه، والذي لا تزيد كفاءته النظرية على نسبة 33 في المائة، لتبين لنا مدى أهمية تلك الحبيبات في مجال الطاقة الشمسية.

- **في الحاسبات الكمومية**

تمثل الحبيبات الكمومية أملا كبيرا للبشرية في تحقيق قفزة تكنولوجية غير مسبوقة فيما يُعرف باسم الحسابات الكمومية في الحالة الصلبة Solid-State Quantum Computing. وتجرى الآن أبحاث مكثفة ترمي إلى استخدام تلك الحبيبات في تخزين البيانات والقيام بالعمليات الحسابية المعقدة، وذلك لما تتفوق به الحبيبات الكمومية على أشباه الموصلات التقليدية من خواص إلكترونية غير مسبوقة. وقد نُشر أخيرا

في عدد شهر يوليو لعام 2009 من مجلة الطبيعة Nature الشهيرة [15] بأن فريق عمل بحثي تابـــع لجامعة ييل الأمريكية Yale University قد تمكن مـــن إنتاج النموذج الأولي من أول معالج حســـابات كمومية للحالة الصلبة Solid-State Quantum Processor يُنتج على مستوى العالم [15].

وعلى النقيض من الأجهزة الإلكترونية التقليدية التي تســـتخدم في تشغيلها الشحنات الإلكترونية لنقل الإشارات Signals وفي أثناء تنفيذها العمليات الحســـابية، فإن الحبيبات الكمومية تســـتخدم الاســـتقطاب الضوئي في تنفيذ تلك العمليات، التي تؤدي إلى زيادة خيالية في سرعة تنفيذ تلك العمليات، نتيجة لتقليل كم الطاقة المفتقدة في أثناء تشـــغيل الأنظمة الحاسوبية.

- **السبائك الفلزية نانوية الحبيبات**

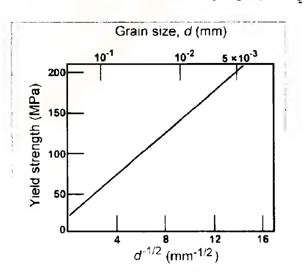
تمرس علماء المواد ومهندســـو إنتاج الســـبائك [16] الفلزية، منذ فترة طويلة، على تخليق ســـبائك قوية تتسم بخواص جيدة، حتى قبل أن يدركوا ويتفهمـــوا البنية الداخلية المهيمنة على تلك الخواص. وقد اقتصرت طرق إنتاج الســـبائك، في الماضي، على عملية تســـخين وصهر العناصر المكونة للســـبيكة لضمـــان تفاعلها وذوبانها معـــا، من أجل تكوين طور الســـبيكة المطلوب إنتاجها. وبعد الحصول على هذا الطور، يُخضع لعدة أيام لإجراء بعـــض العمليات الميتالورجية عليه، مثل المعالجـــات الحرارية والميكانيكية، وذلك من أجل تحسين خواصه وزيادة قوته، ما يضمن الحصول على منتج صلب ومتين يتحمل عمليات التشغيل المستقبلية له.

وكما تناولنا مسبقا بالشرح والتفصيل [17]، فإن تصغير مقاييس أبعاد الحبيبات الداخلية للمواد بصفة عامة، يؤدي إلى تحسين خواصها المُختلفة. ومن ضمن هذه الخواص التي تتحسن من جراء تصغير الحبيبات الداخلية للســـبائك الفلزية الخواصُ الميكانيكية [18] الممثلة في رفع مقاومة ومتانة الســـبيكة، وزيادة صلادتها وقدرتها على تحمل الإجهادات الخارجية التي تتعرض لها في أثناء عملية التشغيل. وقد أدت نتائج الأبحاث الرائدة التي أُجريت في حقبة الثمانينيات من القرن الســـابق [19] إلى تكثيف الأنشطة

البحثية المتعلقة بدراسة السلوك والخواص الميكانيكية للسبائك الفلزية نانوية البنية الحبيبية Nanocrystalline Metallic Alloys، وتخليق عائلات جديدة منها، تتفوق في خواصها الميكانيكية على نظيرتها من المواد التقليدية كبيرة الحبيبات.

ويوضح الشكل (8 - 4) نموذجا للعلاقة الرابطة بين متغيرين، هما: مقاييس أبعاد حبيبات Grain Size لسبيكة البرونز، ومقدار المقاومة التي تُبديها السبيكة كي لا تخضع للإجهادات التي تتعرض لها Yield Strength. ومن الشكل المبين نستطيع ملاحظة علاقة التناسب العكسية التي تربط بين المتغيرين، فمع تناقص مقاييس أبعاد حبيبات السبيكة، تزداد مقاومتها أمام إجهادات الخضوع [18].

وقد أشارت نتائج أبحاث أخرى، إلى أن المقاومة القصوى لإجهاد الشد Ultimate Tensile Strength التي تبديها سبيكة الحديد والنيكل قد تضاعفت نحو خمس مرات عند تصغير مقاييس أبعاد الحبيبات الداخلية للسبيكة، ذلك في الوقت التي تضاعفت فيه صلادتها نتيجة هذا التصغير الحبيبي، لتصل إلى نحو ستة أمثال ما كانت عليه [20].



الشكل (8 - 4) : اعتماد مقاومة المقاومة التي تُبديها سبيكة البرونز لإجهادات الخضوع Yield Strength، على أبعاد مقاييس حبيباتها Grain Size [18].

التطبيقات

تجد سبائك المواد الفلزية، نانوية البنية الحبيبية، لنفسها مجالا عريضا في التطبيقات التكنولوجية المتقدمة، حيث تدخل عنصرا أساسيا في تصنيع المُنتجات المبتكرة المُستخدمة في القطاعات الصناعية التالية:

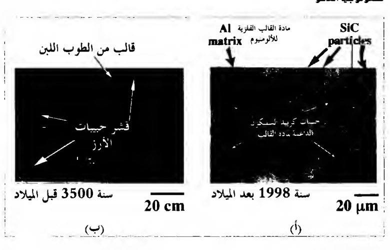
- صناعة هياكل ومحركات السيارات (سبائك الألومنيوم Al، سبائك الماغنسيوم Mg).
- صناعة الطائرات والمركبات الفضائية (سبائك التيتانيوم Ti).
- صناعة المحولات والمواتير الكهربية (سبائك المواد المغناطيسية Magnetic Materials، مثل سبائك الحديد Fe والكوبالت Co، والعناصر الأرضية النادرة Rare Earth Elements).
- صناعة الموصلات فائقة الموصولية الكهربية المُستخدمة في صناعة الحواسب فائقة السرعة (مثل سبائك النيوبيوم Nb المُضافة إليها مواد لأشباه الموصلات مثل الجيرمانيوم Ga، القصدير Sn).
- الرقائق الإلكترونية (فلز النُحاس ذو الحبيبات النانوية).
- صناعة الأغشية والرقائق المُستخدمة في تغطية أسطح المُعدات والأدوات الفلزية، بغرض حمايتها من التآكل عن طريق البري والصدأ (مثل سبائك الزنك Zn، النيوبيوم، التيتانيوم)..
- صناعة أوعية وبطاريات تخزين الهيدروجين (مثل سبائك الماغنسيوم).
- صناعة بطاريات السيارات والمركبات (سبيكة الرصاص - الكالسيوم Pb-Ca).
- صناعة أغطية فلزية رقيقة السمك، لتغليف هياكل المركبات الفضائية والصواريخ، لحمايتها من الانهيار إثر تعرضها لدرجات الحرارة المرتفعة خلال رحالاتها في الفضاء الخارجي (سبائك التجستن W، المولبديوم Mo).
- التطبيقات الحديثة في المجال الطبي، الحالية والمستقبلية:

- إنتاج الشرائح والمسامير المُستخدمة في تثبيت العظام المكسورة داخل الجسم (سبائك الصلب المقاوم للصدأ، وسبيكة التيتانيوم – ألومنيوم – فانديوم Ti6Al4V [21].
- إنتاج الدُعامات الخاصة بتوسيع شرايين القلب (سبائك التيتانيوم) [22].
- تخليق حبيبات الذهب النانوية المُتوقع اســتخدامها في دحر الأورام السرطانية داخل الجسم [23].
- تخليــق حبيبــات الفضة النانوية المُســتخدمة فــي قتل أنواع عديــدة من البكتريا، والمُرجح توظيفها فــي قتل أنواع مختلفة من الفيروسات [24].

- **المتراكبات النانوية**

كما أشرنا من قبل [25]، تعد المتراكبات – التي تتزاوج بها خواص عديدة ناشــئة عن خلط مادتــين أو أكثر بعضها ببعض – أحد أنواع المواد الهندســية المتميزة، وذلك لما لها من صفات وتطبيقات عديدة في المجالات الهندســية المتنوعة. ومن الطبيعي أن يثمر هذا التآلف بــين عدة مــواد مختلفة في الخــواص ومتباينة في الســلوك، مادة متراكبــة ليس لها نظير حيــث يجتمع عدد من الخــواص المتفاوتة فيها. وقد أضافت تكنولوجيا النانو بُعدا مهما جديدا لتلك الفئة من المــواد، وذلك من خلال تخليق حبيبــات متناهية في الصغر، تُوظف كمواد داعمــة ومقوية – دُعامات نانويــة Nano-Reinforcements لمادة الأســاس. وقد أثبتت تلك الحبيبــات تفوقها على نظيرتها من مســاحيق الحبيبات كبيرة الحجم في تحســين مادة الأساس، ورفع مقاومتها وصلادتها.

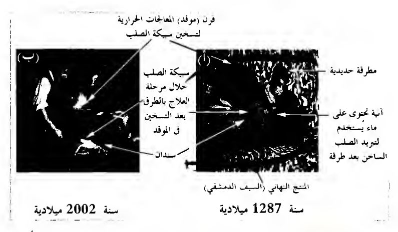
ويعرض الشكل (8 – 5 «أ») صورة مأخوذة بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني Scanning Electron Microscope لعينة من متراكبة الألومنيوم المُدعم بحبيبات من كربيد الســيليكون SiC [3]. وتُوظف تلك المتراكبة في أغراض صناعية متعددة، منها صناعة بلوكات محركات السيارات وكذلك في صناعة بعض من أجزاء هياكل الطائرات والصواريخ.



الشكل (8 - 5): يوضح الشكل (أ) صورة مجهرية بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني لعينة مادة متراكبة تتألف من قالب المادة الأساسية وهو سبيكة لفلز الألومنيوم الذي تمت تقويته بإضافة نسب حجمية مختلفة من حبيبات كربيد السيليكون شديدة الصلادة، وذلك بغرض الحصول على مادة متراكبة خفيفة الوزن عالية المقاومة والصلادة، ما يؤهلها للتطبيقات المدنية والعسكرية في مجالات صناعة السيارات، الطائرات والصواريخ [25]. ويبين الشكل (ب) صورة لقالب من الطوب اللبن الذي استخدم لبناء سور الجدار الخارجي لمعبد الأقصر جنوب مصر، حيث تمت تقوية تلك القوالب بإضافة القشور الخارجية لحبيبات الأرز إليها [18، 26]. ويبين الشكل بوجه عام مدى تطابق فلسفة تخليق المواد المتراكبة على الرغم من اتساع الهوة الزمنية الفاصلة بين المشهدين.

تصحيح علمي وتاريخي واجب

قد يظن البعض منا، أن المواد المتراكبة هي وليدة اليوم أو الأمس القريب - كما يحلو لكثير من علماء الغرب أن ينسبوا فكرة تصنيعها إليهم - وهذا في الواقع مخالف للحقيقة. فكما ذكرت في أحد الكتب العلمية المنشورة لي في الخارج [18]، فإن فكرة دمج مادتين أو أكثر داخل مادة أخرى، ترجع إلى أكثر من 5 آلاف عام، حين أدرك الإنسان المصري القديم أن إضافة القشور الخارجية لحبيبات الأرز إلى قوالب الطوب اللينة (الطوب اللبن) المُصنعة من الطمي Mud، تعمل على تقوية ودعم هذا الطوب المستخدم في أغراض البناء وحمايته من التشققات (الشكل 8 - 5 «ب»). لذا فهي تضيف خواص لم تكن موجودة أصلا في مادة الطمي.



الشكل (8 - 6): توضح الصورة في الشكل (أ) رسما من وحي الخيال نُشر كغلاف لإحدى الدوريات العلمية المتخصصة التي يشارك في تحريرها مؤلف هذا الكتاب [28]. وتوضح الصورة منهاجية الصُناع العرب الأوائل وتقنياتهم الموظفة لتحسين الخواص الميكانيكية لسبيكة الصلب المستخدمة في صناعة السيف الدمشقي، وذلك في الربع الأخير من القرن الثاني عشر الميلادي. هذا بينما تعرض الصورة الفوتوغرافية في الشكل (ب) مسبكا خاصا بإحدى المدن الألمانية الشهيرة بصناعة الصلب [29]. وتبرهن الصورتان في الشكل أعلاه على فضل العرب في نقل ابتكاراتهم وتقنياتهم إلى الصناع الأوروبيين، من دون مقابل، وذلك خلال فترة الفتح العربي وامتداد الخلافة غربا إلى جنوب فرنسا. وغني عن الذكر، فقد كانت أوروبا في تلك الحقبة الزمنية بعيدة كل البعد عن صناعة الصلب الجيد، إذ كانت تعاني تفشي الفقر والجهل الدامس الذي امتد بها إلى أواخر القرن الخامس عشر الميلادي. وعموما، فإن كلتا الصورتين توضحان مدى التشابه في طرق المعالجة في الماضي والحاضر، وإن اختلفت الأدوات المُستخدمة وتباينت نوعية وهوية المنتج المُصنَّع.

هذا وقد أدرك أجدادنا العرب، في القرن الثاني عشر الميلادي، كيف أن المعالجات الحرارية والميكانيكية للصلب [27]، المتمثلة في تكرار عمليات تسخين الصلب ثم طرقه وهو ساخن (الشكل 6 – 8 «أ») تُكسب الصلب صلادة ومتانة فائقتين، ما يُحسن من خواصه الميكانيكية والفيزيائية. وقد أيدت الدراسات الحديثة هذا المذهب من المعالجات، الذي ابتكره العرب في تلك الفترة، وذلك لأن تلك المعالجات

تـؤدي إلى تكوُّن طبقات رفيعة السـمك من الصلب مختلفة التركيب، تتوالى متراصة بعضها فوق بعض، معطية في ذلك متراكبة نموذجية، وصلبا قاسـيا متينا. وقد تناسـى البعض موقعة حطين حين أذاقت السـيوف الدمشـقية العربية الغزاة مرارة الهزيمة، عندما تحطمت سـيوفهم الهزيلة على نصال السـيوف العربية. وأستطيع التأكيد أن العرب كانوا في طليعة شـعوب الأرض الذين تمرسوا وابتكروا طرقا فريـدة لمعالجة الصلب، تلـك الطرق التي لا نزال نسـتخدمها حتى يومنا هذا، وإن اختلفت المسـميات وتنوعت التقنيات (الشكل 8 - 6 «ب»). وحتى يومنا هذا، فما زالت سـبيكة الصلب الخاصة بالسيف الدمشقي تلقى اهتماما كبيرا من الباحثين من مختلف المراكز البحثية المعنية بدراسـة وسلوك السـبائك الفلزية، وتأثير العمليات الحرارية والميكانيكية في خواصها.

- **تصنيف المتراكبات النانوية وتطبيقاتها**

يمكن تصنيف المتراكبات النانوية، شـأنها شـأن المتراكبات التقليدية، وذلك رجوعا إلى نوع مادة القالب - مادة الأسـاس المُراد إضافة سـمات وخواص جديدة إليها، عن طريق دعمها بحبيبات نانوية لمادة أو مواد أخرى تختلف عنهـا - التي عادة ما تكون من مواد لينة أو ضعيفة، أو تفتقر إلى إحدى الخواص المهمة.

- **متراكبات الكربون**

تتميز تلـك الفئة من المتراكبـات عن غيرها، بانخفـاض تكلفتها وسهولة الحصول عليها من مصادر متعددة غنية بالمواد الكربونية، مثل الفحـم. وتصنع متراكبات هذا النوع مـن القوالب بطريقة تكنولوجيا المسـاحيق Powder Technology، وذلـك من خـلال كبس وتجميع مسـاحيق الكربون الناعمة، باستخدام المكابس الساخنة عند درجات حرارة عالية.

وعلى الرغم من أن معظم المواد المقوية المضافة إلى هذا النوع من القوالب تكون عادة أليافا كربونية Carbon Fibers نانوية البنية، فإن تلك المواد المضافة قد تختلف وتتنوع، وذلك بناء على طرق تصنيع المتراكبة والخواص المطلوب الحصول عليها.

وتُعد قابضات السيارات (دوبرياج) Clutches ووسائد فرامل Brake Pads الطائرات، بعضا من الأمثلة التطبيقية المهمة التي فيها يُوظف هذا النوع من المتراكبات.

- **متراكبات السيراميك**

على الرغم من تميز قوالب هذا النوع من المواد السيراميكية بارتفاع صلادته، ومقاومته للإجهادات الناشئة عن أحمال الضغط، مع ثباته الحراري والكيميائي، فإنه فقير في التوصيل الكهربي والحراري. لذا، فتتنوع المواد النانوية المضافة إلى تلك القوالب، من عناصر أو سبائك فلزية، مواد سيراميكية أو ألياف زجاجية تبعا للخواص المطلوب الحصول عليها والتطبيقات التي ستوظف فيها. وتستخدم هذه الفئة من المتراكبات في تصنيع منتجات التشغيل التي تعمل عند درجات الحرارة العالية، مثل أجزاء من محركات الصواريخ، أو تلك الأجزاء المعرضة لعوامل البري والصدأ والتآكل في أثناء التشغيل، مثل بعض أجزاء الماكينات والمحركات.

- **المتراكبات الزجاجية**

تتشابه المواد الزجاجية Glasses مع المواد السيراميكية في كثير من الخواص، فهي مواد قصفة ذات صلادة مرتفعة وثبات حراري عال. وتتألف متراكبات هذه الفئة من القوالب عن طريق إضافة مواد صلبة، مثل حبيبات نانوية الأبعاد من الأكاسيد الفلزية أو الألياف. هذا وتتميز متراكبات هذا النوع بمقاومتها الفائقة عند التشغيل في درجات الحرارة العالية Strength at High Service Temperatures، ما يوفر لها عوامل النجاح للاستخدام في صناعة مكونات أجزاء

المحركات المقاومـــة للحـــرارة Heat Resistance Parts for Engines، وأيضـــا في أجزاء المحركات التي لها صلة بالعوادم ومخلفات الاحتراق الداخلي، مثل غرف العادم Exhaust Chambers وحلقات تجميع العادم Exhaust-Collector Rings.

• المتراكبات الفلزية

تعد قوالب الفلزات أكثر أنواع القوالب شـيوعا واسـتخداما. ويتوقف اختيار الفلز المسـتخدم في تصنيع مادة القالب على الغرض من استخدام المتراكبة النانوية والخواص المرجوة منها. فمثلا، إذا كان الهدف هو تأليف متراكبات للاستخدام في بيئة أو أجواء مؤكسدة Oxidizing Environments عند درجات الحرارة العالية، فإن قوالب فلز التنجستن تكون الأنسب لهذا الغـرض، وذلك نظرا إلى الثبات الحراري والكيميائـي لهذا الفلز المقاوم للانصهار. وقوالب العناصر الفلزية الخفيفة، مثل الألومنيوم والماغنسيوم تجـد مكانا مرموقا في الصناعات التي يكون الوزن فيها عاملا مهما، مثل صناعة السيارات والطائرات والمركبات الفضائية.

وتتألف المتراكبـات الفلزية من قوالب لمواد فلزية تضاف إليها نسـبة حجمية بسيطة من مواد مدعمة لعناصر فلزات حرة أو مواد سيراميكية.

• متراكبات البلمرات

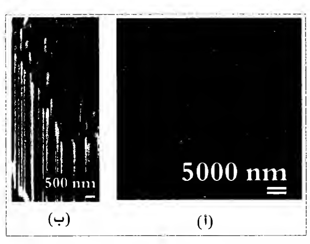
تتكون قوالب هذا النوع من المتراكبات من مادة البوليسـتر Polyesters أوالفينيل إسـتيرز Vinyl Esters، وذلك نظرا إلى شيوع استخدامهما وقلة تكلفتهما. وعادة ما تُدعم هذه القوالب بالألياف الكربونية النانوية أو أنابيب الكربون النانوية، وكذلك أنابيب الصلصال الطبيعي أو المُخلَّق. وسبب اختيار هـذه الأنواع من المواد النانوية الداعمة يرجع إلـى ما تتميز به من مقاومة عالية وصلادة، علاوة على أنها خفيفة الأوزان، وبالتالي لن تؤثر سـلبا في خواص هـذه القوالب من ناحية الوزن. وتتميز الأليـاف والأنابيب النانوية للكربون بعدم التأثر بالرطوبة، وبثباتها الكيميائي العالي، وارتفاع مقاومتها أمام كل الأحماض والقلويات والمذيبات، عند درجة حرارة الغرفة.

وتوظـف متراكبات هذا النوع مـن القوالب البلمريـة اليوم بكثرة في تصنيـع الأدوات الرياضية، مثل مضارب التنس وأعصية مضارب الغولف، وكذلك في تصنيع قضبان صيد الأسماك. كما أن هذه المتراكبات تعد مواد واعدة حين تستخدم في بعض من أجزاء هياكل السيارات والطائرات.

• الأسلاك النانوية

علـى الرغم ممـا تمتلكه أنابيـب الكربون النانويـة [30] من خواص وصفات فريدة، وتطبيقات رائدة في كل المجالات بلا استثناء، فإن الطرق المسـتخدمة في تنمية Grown أطوال تلك الأنابيب، وتصويب أشـكالها المنحنية، التي تشـبه خيوطا متشابكة وملتف بعضها حول بعض (الشكل 7 - 8 «أ»)، لجعلهـا مسـتقيمة وقائمة، تعد مسـألة تقنيـة صعبة حتى هذه اللحظة. وتحتاج التطبيقـات الصناعية إلى أنابيب نانوية الأقطار، طويلة ومسـتقيمة، من أجل توظيفها في المجـالات المتعلقة بالصناعات الإلكترونيـة المتقدمـة. أيضا، فإنه على الرغم مـن الجهود المكثفة التي يقـوم بها كثير من الباحثين حول العالـم، من أجل تنمية أطوال الأنابيب النانوية وفردها Straighten لتكون على هيئة عصي طويلة منتصبة، فإن هذه المعضلة ما زالت تمثل تحديا تقنيا كبيرا، قد يحتاج فك شـفرته إلى وقت طويل وجهود مضاعفة.

لكـن، هـل يعتـرف العلماء بـأن قامـوس أي لغة يحتـوي على كلمة «مسـتحيل»؟ فـي الواقع، وكما يعلم القارئ الكـريم، لا وجود لهذه الكلمة فـي قواميس اللغة الخاصة بتلك الفئة المثابرة من البشـر. قد تُسـتخدم كلمات وصفات أخرى مثل «صعب» (Hard)، من أجل شحذ الهمم البحثية ورفع الطاقات الابتكارية عنـد الباحثين والعلماء. وفي إطار هذا المفهوم، تجلت فكرة الاسـتعاضة عن اقتـراح توظيف أنابيب الكربون - على الأقل في المرحلة الراهنة - في صناعة الدوائر الإلكترونية، وإحلال الأسـلاك النانوية Nanowires [31]، التي يمكن تخليقها على هيئة أشـكال عمودية مسـتقيمة، وتنمية أطوالها لتصل إلى عدة مئات من النانومترات، (الشكل 8 - 7 «ب»)، بدلا من تلك الأنابيب.



الشكل (8 - 7) : صور مأخوذة بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني لعينات حُضِرت بمعمل مؤلف هذا الكتاب لمواد نانوية من: (أ) انابيب كربون نانوية أحادية الجدران، و(ب) أسلاك نانوية راسية، مخلقة من عنصر النُحاس الفلزي (32).

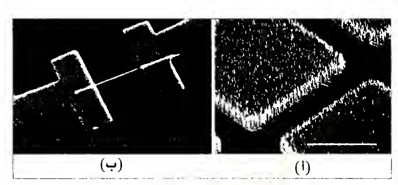
- **ماهيتها؟**

بداية، يمكننا وضع تعريف مبسط للأسلاك النانوية، فنقول إنها عبارة عن أســـلاك رفيعة جـــدا، ذات أقطار نانوية الأبعاد، تتخذ أشـــكالا قائمة ومستقيمة. وتتميز تلك الأسلاك بإمكان تخليقها من مصادر عديدة، وفقا للخواص المطلوب الوصول إليها والاســـتخدامات المقُترحة. لذا، فقد تكون هذه الأسلاك النانوية، أســـلاكا فلزية مُصنعة من عناصر الفلزات الحرة للنيـــكل Ni، النُحاس Cu، الذهب Au، أو البلاتين Pt، وســـبائكها. ويمكن أيضا، تخليقها من عناصر مواد أشـــباه الموصلات، مثل الســـيليكون Si أو الجاليوم Ga، أو من مركباتها المختلفة. ويضاف إلى ذلك إمكان إنتاج تلك الأســـلاك من مواد المحفزات الكهروضوئية للأكاســـيد، مثل ثاني أكسيد السيليكون SiO_2، وأول أكسيد الزنك ZnO، وغيرهما.

- **التطبيقات**

لـــن تجد الصناعـــات الإلكترونية أفضل من الأســـلاك النانوية كمواد فريـــدة لصنع الجيـــل الجديد من الترانزســـتورات والدوائـــر الإلكترونية المتناهيـــة الصغر. ولتحقيق هـــذا الغرض، يُؤلف هيكل الترانزســـتور من

ترتيب مجموعة ضخمة من تلك الأسلاك النانوية، إما عن طريق توجيهها وتعليقها بصورة رأسية على سطح قاعدة مادة الترانزستور، كما هو موضح بالشكل (8 – 8 «أ»)»، أو بترسيبها – بإحدى الطرق الكيميائية – على هيئة طبقات (الشكل 8 – 8 «ب»).



الشكل (8 – 8) : صور مأخوذة بواسطة الميكروسكوب الماسح الإلكتروني لنماذج أولى من ترانزستورات متناهية الصغر مخلقة من مواد لأشباه الموصلات على هيئة: (أ) أسلاك نانوية رأسية لمادة نيتريد الغاليوم GaN تم تعليقها وتوجيهها في شكل راسي [33]، (ب) طبقات مؤلفة من مركب فوسفور الإنديوم InP [34].

ومن الاستخدامات الراهنة والمستقبلية للأسلاك النانوية، نذكر ما يلي:

- الترانزستورات المستخدمة في تصنيع المعالجات الصغيرة Microprocessors في الحواسب والأجهزة الإلكترونية الدقيقة.
- النظم الكهربائية والميكانيكية الميكرومترية والنانومترية الخاصة بأجهزة الروبوت النانوية Nanorobots، المزمع توظيفها في التعامل الموضعي مع الأورام السرطانية، وذلك عن طريق إدخالها جسم الإنسان المصاب عبر دورته الدموية.
- من المُعتقد أن تؤدي الأسلاك النانوية دورا مهما في تصنيع الحواسب الكمومية Quantum Computers.
- صناعة الخلايا الشمسية الفوتوفولطية.
- الحساسات والمجسات النانوية Nanosensors.

■ صناعة دوائر التوصيل الإلكترونية الخاصة بالشرائح التي ستُستخدم في تحليل الحمض النووي Deoxyribonucleic Acid DNA للإنسان، وتحديد الصفات الوراثية له.

● **مواد الطلاء النانوية واستخداماتها**

عادة ما ينجم عن تشـــغيل المُعدات والماكينات، أن تنشـــأ على أسطحها شـــروخ وأن تعاني أنواع تآكلات ناجمة عن البري أو الصدأ، ما يؤدي إلى انهيار المُعدَّة أو الماكينة بعد فترة من التشغيل. لذا، فإن العمليات الخاصة بتغطية أســـطح المُعدات والأدوات المســـتخدمة فـــي التطبيقات الصناعية المختلفـــة، تُعد من المســـائل التقنية التي أولتها تكنولوجيـــا النانو اهتماما كبيرا. وتهدف الأغشـــية النانوية المُســـتخدمة في طلاء أسطح المواد إلى تعزيز وتحســـين خواص تلك الأســـطح، وذلك من خلال تغليفها بأغشـــية مؤلفة من حبيبات نانوية - عادة ما تكون من كربيدات أو أكاسيد الفلزات - تتمتـــع بصلادة فائقة ومقاومة عالية، تحولان دون تعرض ســـطح المادة الأصلي للانهيار أو التآكل.

وتســـتخدم كذلك الأغطية والدهانات النانوية في أغراض أخرى، مثل تغطية أســـطح الهيـــاكل الداخلية للثلاجات وغســـالات الملابس والصحون بطبقـــة مؤلفة من حبيبات نانوية من فلـــز الفضة، تتراوح أبعـــاد أقطارها بين 2 و5 نانومترات، حيث يمنع وجود هذه الدهانات الفضية نانويـــة الحبيبات، من التراكم البكتيـــري داخل تلك الأجهزة والأدوات الكهربية.

● **الطرق المُستخدمة في الطلاء**

تختلـــف الطرق المســـتخدمة في تخليـــق طبقة الطـــلاء النانوي على الســـطح المراد تغطيته، وفقا لسمك الطبقة المُراد الحصول عليها وطبيعة كل من مـــادة الطلاء ومادة الســـطح. وعادة ما تُوظف تقنيات الترســـيب الكيميائية، أو تقنيات رش السطح بمساحيق الحبيبات النانوية، حيث توفر هذه الطرق الحصول على طبقات من الحبيبات النانوية تتمتع بالتماســـك

وبارتفاع كثافتها. ويتراوح سُمك طبقة الطلاء بين بضع مئات وعدة ألوف من النانومترات، وفقا لنوع الإجهادات وظروف التشغيل والعوامل البيئية التي يتعرض لها سطح المُعدة أو الآلة عند التشغيل.

• **المحفزات النانوية**

كما يعلم القارئ الكريم، فإن المقصود بالمحفزات Catalysts هو تلك المواد التي تُوظف بهدف تعزيز وتحفيز التفاعلات الكيميائية ورفع معدلاتها، وذلك من دون أن تُستنفد تلك المحفزات أو يحدث أي تغييرات في بنيتها الكيميائية. ومن الطبيعي أن تؤدي تكنولوجيا النانو دورا مهما ورئيسيا في تخليق أنواع جديدة من تلك المحفزات، تعرف باسم المحفزات النانوية Nanocatalysts، التي تُستخدم على النطاق الصناعي في كثير من العمليات الكيميائية، بما فيها تلك التفاعلات الخاصة بعمليات تكرير زيت النفط Oil Refining.

• خواص المحفزات النانوية

تتسم المُحفزات النانوية بعدة خواص رئيسية، تتفوق بها على المحفزات التقليدية، ومن بين تلك الخواص المهمة، ما يلي:

■ تمتعها بمساحة أسطح عالية، ما يكفل تلامس الذرات والجزيئات الموجودة على أسطح حبيباتها مع ذرات وجزيئات المواد الداخلة في التفاعل Reactants. وتعد هذه الخاصية التي تمتلكها تلك المحفزات، الخاصية الأهم التي تعتمد عليها معدلات أي تفاعلات كيميائية.

■ تُتيح تكنولوجيا النانو التحكم في مقاييس أبعاد التجاويف الداخلية لجزيئات هياكل المحفزات التي تمر عبرها المواد المتفاعلة، وذلك وفقا لمقاييس أبعاد أقطار تلك الجزيئات.

■ تمتلك المحفزات الكيميائية قدرة عالية للامتزاز Adsorption.

• **التطبيقات**

لا تنحصر تطبيقات المحفزات النانوية في مجالات معينة، ولكنها تمتلك قائمة طويلة من التطبيقات المختلفة، التي من بينها:

- تكرير زيت النفط.
- الصناعات البتروكيميائية.
- إنتاج المواد الكيميائية المختلفة ومركباتها.
- تنقية الهواء.
- معالجة التربة والمياه الجوفية وتخليصهما من الملوثات الكيميائية والميكروبيولوجية.
- معالجة مياه الشرب وتنقيتها.
- إنتاج المواد المُخزنة لغاز الهيدروجين.
- الصناعات الدوائية.
- إنتاج وحفظ الأغذية.
- توظيف حبيبات الفلزات النبيلة مثل البلاتين، البلاديوم Pd المستخدمة في السيطرة على انبعاثات عوادم السيارات، وكذلك العوادم الناتجة من محولات الطاقة.
- تستخدم كإضافات إلى وقود محركات السيارات لتحسين كفاءته، وتقليل معدلات استهلاكه للوقود.



الباب الثالث

التطبيقات الحالية والمستقبلية لتكنولوجيا النانو

9

الطب النانوي

«أعطت تقنيات طب النانو كثيرا من الأمل في استهداف الأورام السرطانية والتعامل معها وحدها دون غيرها من الخلايا غير المصابة...»

المؤلف

لم يكن من المُستغرب أن يحتل قطاع الطب والدواء والرعاية الصحية رأس قائمة اهتمامات وتطبيقات تكنولوجيا النانو، وهي التي سخرت كل العلوم الأساسية وروضت جميع التقنيات الحديثة من أجل صحة وسعادة البشر، وسارت بنا نحو آفاق جديدة كانت تحلُم بها البشرية طوال قرون عديدة. وقد كانت هذه التكنولوجيا على موعد مع القدر لتتزامن مع ثورة التكنولوجيا الحيوية Biotechnology التي تعانقت مع تكنولوجيا النانو ليُكَونا معا نهجا بحثيا متقدما يرمي إلى دراسة مكونات خلايا الكائن الحي دراسة دقيقة، وذلك على المستوى الجزيئي للخلية الواحدة.

وقد استطاع هذا التحالف القائم بين التكنولوجيتين، المعروف باسم «تكنولوجيا النانو الحيوية Bionanotechnology»، أن يجذب إليه كثيرا من اهتمام الباحثين المتخصصين في مجالات الفيزياء والأحياء والكيمياء من مختلف المدارس البحثية في العالم، وذلك على مدى سنوات العقد الأول من هذا القرن. وليس ثمة شك، في أن فئة المواد النانوية المستخدمة في تطبيقات تكنولوجيا النانو الحيوية - يطلق عليها اسم المواد الحيوية النانوية Bio-nanomaterials، تعد الأكثر نموا وازدهارا في مجال الأبحاث العلمية، وذلك نظرا إلى ما تتمتع به من خواص فريدة أهلتها للدخول في العديد من الاستخدامات الفعلية المتعلقة بصحة الإنسان. وعلى مدى السنوات الخمس الأخيرة، تزايد الاهتمام البحثي بتلك المواد بصورة مضاعفة، الأمر الذي أدى إلى تحقيق نجاحات كبيرة في طرق تحضيرها، حيث تم تخليق حبيبات صغيرة الحجم منها لا تتعدى مقاييس أبعاد أقطارها 2 نانومتر، مما يعني زيادة فاعليتها وتربعها على قمة المواد الحيوية الفعالة النشطة Bioactive Materials.

وكما نعلم فإن مقاييس أبعاد خلايا أي كائن حي لا تقل عن 10 ميكرومترات، إلا أنها تتألف من أجزاء متعددة تتضاءل أبعادها بكثير عن مستوى الميكرومتر لتصل إلى بضعة نانومترات، مثل جزيء البروتين الذي يصل حجمه إلى نحو خمسة نانومترات. وحيث إن نطاق العمليات البيولوجية بخلايا أعضاء الكائن الحي تقع على مستوى أجزاء من الخلية الواحدة، فإن المواد النانوية التي يتم تخليقها تعد مواد انتقائية مناسبة للتفاعل مع تلك الجزيئات البيولوجية الصغيرة المكونة للخلية مثل الأحماض النووية والبروتينات.

ومن هذا المنطلق يبرز دور علم وتكنولوجيا النانو في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية الخاصة بمراقبة الوظائف والعمليات الحيوية داخل الخلية الحية الواحدة وتشخيص سماتها، مع رصد التغيرات الطارئة على سلوكها والناجمة عن إصابتها بفيروس ما، أو حدوث خلل معين في انقساماتها؛ لذا فإن التطبيقات الناجحة للمواد

النانوية المستخدمة في العلاج والتشخيص تكمن في قدرتها على اختراق الخلايا الحية بالجسم والوصول إلى جزيئات الخلية لتقديم العلاج. هذا، وتعتني كذلك تكنولوجيا النانو الحيوية بدراسة المواد الكيميائية المُكونة للخلايا الحية دراسة دقيقة للتعرف على مكوناتها والقدرة على تحضيرها معمليا. ويتضح لنا جليا أنه لولا التقدم في علم وتكنولوجيا النانو لما كان لهذه الطفرة التي حققتها البشرية في مجالات معقدة تخص علم الأحياء الجزيئي، مثل فك الشفرة الجينية، في أن تظهر وتزدهر، وربما ظلت لغزا محيرا عقودا وعقودا من الزمن.

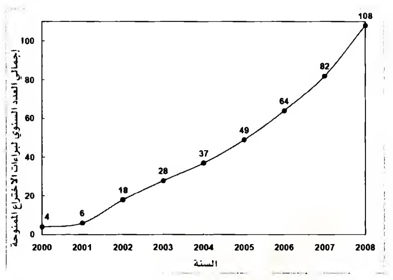
وقد كان لتداخل تكنولوجيا النانو الحيوية مع الكيمياء الحيوية، وعلم الوراثة والجينات، وعلم الأحياء الجزيئي أعمق الأثر في تطور طرق التشخيص والكشف المبكر عن الأمراض والمشاكل الصحية، مع معرفة الأسباب المؤدية إلى المرض معرفة دقيقة. وأدى هذا بطبيعة الحال إلى تحقيق طفرة كبيرة في تكنولوجيا صناعة الدواء وابتكار طرق فريدة وفعالة في عمليات توصيل الدواء إلى خلايا معينة من خلايا جسم الإنسان، والانفراد بتقديم تقنيات حديثة ومتقدمة لقهر السرطان ودحره موضعيا، من دون أدنى تدخل جراحي. وفي الوقت نفسه، كان لتكنولوجيا النانو الحيوية أعمق الأثر في تحقيق نجاحات مستمرة في الابتكارات المتعلقة بموضوع هندسة زراعة الأنسجة في جسم الإنسان، خاصة في مجال طب وجراحة اللثة والأسنان.

ما المقصود بطب النانو؟

لم يجد مُصطلح طب النانو Nanomedicine صعوبة في أن يحتل مكانا مهما وبارزا في قائمة المُصطلحات الطبية والدوائية، وأن يتردد في كل المؤتمرات الطبية والدوريات العالمية المهتمة بالعقاقير الطبية والرعاية الصحية. وإذا ما أردنا أن نَضعَ تعريفا محددا لهذا المصطلح، فسوف نُعرفه بأنه مجموعة من تقنيات

طبية حديثة تقع تحت مظلة تكنولوجيا النانو لتشـمل كل ما يتعلق بالمجـالات الطبية المختلفة الرامية إلى تحسـين صحة الإنسـان والحفاظ على سـلامته. وقد أخذت تلك التكنولوجيا على عاتقها منذ بدايـة هذا القرن تقديم ابتـكارات واختراعات تقَنية مُذهلة تخـص مجـالات الطب والدواء، والكشـف المبكر عـن الأمراض والأورام. ولعل النسبة الكلية لمبيعات المواد الطبية المُنتجة بواسطة تكنولوجيـا النانو في العـام 2007، والتي بلغت نحو 15 في المائة من إجمالي المبيعات الكلية للمواد والأجهزة النانوية (146.4 مليار دولار) لخيـر دليل على مـا يحققه هذا الفـرع الحيوي المهم من نجاحات متواصلة ومستقبل واعد.

ومنـذ بزوغ الألفية الثالثة، قام طب النانو بتحقيق خطوات رائدة تقود العالم اليوم إلى ثورة طبية شاملة، تمثلت في تغيير كامل لمفاهيم طرق العلاج التقليدية وتطوير تقنيات التشخيص والكشف المُبكر عن الأمـراض والأورام. ومن الجدير بأن يذكر هنا، أنه خلال السـنوات الثـلاث الماضية، ونتيجة للتقدم السـريع والمتقن فـي مجال بحوث تكنولوجيـا النانو الحيويـة حُققت طفرات مثيرة تمثلـت في ابتكار أنـواع متقدمة من أجهزة التوصيف وظفت من أجل فهم وتحليل بنية وتركيب الحامض النووي DNA للإنسان والفيروسات على حد سواء. وأدى هذا بطبيعة الحال إلى معرفة سـلوك الأمراض والفيروسـات وميكانيكيـة حركتها وتنقلاتها داخل الجسـم ومعرفة الطرق والحيل التي تسـلكها لمهاجمة مكونات وجزيئات الخلايـا الحية في أعضاء الجسـم. ويوضح الشـكل (9 - 1) معدلات النمو المتزايدة في إنتاج الأدوية والعقاقير المُصنعة بتقنيات تكنولوجيا النانو مُمثَلة في التزايد المسـتمر في منح براءات الاختراع لتلك المنتجـات المُحتكرة من قبل شركات الدواء العالمية ومراكز البحوث المهتمة والتي وصل عددها إلى مـا يقرب من 400 براءة خلال الفتـرة من العام 2000 إلى منتصف العام 2008 [1].



الشكل (9 - 1) : إجمالي العدد السنوي لبراءات الاختراع الممنوحة في مجال العقاقير الطبية المُصنعة بواسطة تقنيات تكنولوجيا النانو في الفترة بين 2000 - منتصف العام 2008 (المصدر: الشكل تم تنفيذه بواسطة مؤلف هذا الكتاب وفقا للبيانات الإحصائية المُستقاة من المرجع الرقم 1)

طب النانو لتشخيص الحالة الصحية

كما سبق ذكره، فإن تكنولوجيا النانو تتيح للإنسان إنتاج مواد ومُصنعات جديدة من خلال التلاعب بذرات المادة وإعادة ترتيبها بالشكل والحجم المناسبين لكي تظهر معهما صفات جديدة لم تكن متأصلة في المادة الأصلية. وقد أدى التحكم في هيكلة المواد المُستخدمة كعقاقير طبية وتصغير أحجام حبيباتها إلى زيادة في قدرات وخواص تلك المواد، مما سمح لها بالتفاعل والتطبيق مع محتويات خلايا الأعضاء الحية. وليس ثمة تأكيد على أن الصفات الفريدة غير المألوفة التي اكتسبتها تلك المواد النانوية المُخلقة قد أدت إلى طفرات كبيرة في طرق العلاج ووسائل الرعاية والمتابعة الصحية. كما كان لها أبلغ الأثر في تقديم الكثير من الحلول الابتكارية مما فعّل مجال الطب الوقائي، وعزّز القُدرات التقنية المستخدمة في التشخيص والكشف المُبكر عن الداء.

هذا ويعد الطب الوقائي أحد أهم المجالات الطبية؛ حيث يعتني بتوظيف مهارات الأطباء والفاحصين لتعزيز صحة الإنســـان ومنع حدوث المرض، مع تسخير كل الأجهزة المستخدمة في الفحوصات الطبية المتعلقة بالاستكشـاف المبكـر للمـرض من خـلال رصـد الكاشـفـات الحيويـة Biomarkers [2]، والأعراض المرتبطة والتي تعد نذيرا ببدء حدوث تغيرات حيوية غير محمودة في الجسم تؤدي غالبا إلى تفشي إصابته بالمرض.

• المختبر المحمول على شريحة

لقــد كان لتكنولوجيا النانو أبلغ الأثر في ريادة قطــاع الطب الوقائي نحو اســتنباط طرق تشخيصية عالية الدقة تُســتخدم فيها أجهزة الفحوص عالية الحساســية. وقد أتاحت تكنولوجيا النانو للمرضـــى غير المتخصصين إجراء بعض من التحاليل الطبية الدقيقة، مثل متابعة نسبة التغير في مستوى تركيز الغلوكــوز في الدم الذي يتم من خلال فحــص قطرة واحدة لعينة من الدم يتم إسقاطها على شــريحة إلكترونية متصلة بجهاز صغير لا يتعدى حجمه حجم الهاتــف النقال. ومن المُنتظر أن يؤدي التقدم في تصنيع مثل هذه الأجهزة إلى زيادة رقعة اســتخداماتها لتشــمل التحاليل المتعلقة بإجراء صورة كاملة للدم، ونسب وجود الكوليسترول بأنواعه فيه، ومتابعة مدى التقدم في العلاج الدوائي من فيــروس ما، وذلك من خلال إجراء تحليــل دوري للدم طوال فترة العلاج. وســوف يتاح كل هذا خلال الســنوات الخمس القادمة على الأكثر، وذلك من خلال أجهزة تحليل صغيرة يُطلق عليها اســم «المختبر المحمول على شــريحة Lab-on-a-Chip»، نظرا إلى صغره الذي لا يتعدى حجم شــريحة من شــرائح أجهزة الحاسوب، كما هو موضح في الشكل (9 - 2 «أ»). وتعتمد فكرة تحليل الدم من خلال هذا الجهاز على أخذ عينة صغيرة جدا من دم الإنســان تُحقن داخل خزان مثبت بالجهاز ومتصل بشبكة من الأنابيب ميكرومترية حيث تمزج بداخلها العينة بمحلول الفحص المُنظم، كما هو مبين بالشكل (9 - 2 «ب»).

وقد أدى التقدم في تقنيات صناعة خراطيش نفاثات الأحبار المســتخدمة في الطابعات القائمة على علم الموائع الميكرومتري Microfluids، والتي يتم فيها ضخ سوائل الأحبار إلى قنوات ميكرومترية ضيقة حيث تتم عملية المزج - أدى إلى إحراز تقدم كبير في صناعة المختبرات المحمولة التي تعتمد حركة السوائل ومزجها بعضها ببعض على نفس الأســس التقنية الخاصة بنفاثات الأحبار ومن دون استخدام أي

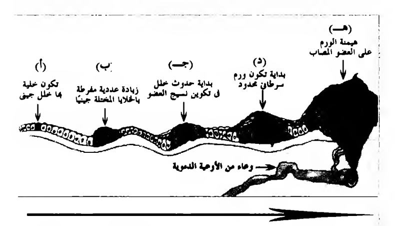
مضخــات تتحكم في توجيه العينة أو محلول الفحص أو دفعها إلى مكان المزج في الأنابيب. ومن المرجح أن يؤدي التقدم المتلاحق في أبحاث علم الموائع الميكرومتري، إلى مزيد من التطوير المتعلق بتصنيع تلك المختبرات المحمولة وتصغير أحجامها.



الشكل (9 - 2): الشكل في (أ) يبين صورة لنموذج حقيقي لجهاز «المختبر المحمول» تم إنتاجه واختباره في العام 2006 (المصدر المرجع الرقم 2). ويوضح الشكل التخطيطي في (ب) شرحا تفصيليا خاصا بمكونات الجهاز، صممه مؤلف هذا الكتاب)

• الكشف المبكر عن الأورام السرطانية

يقوم جسم الإنسان في كل لحظة بتغيير خلاياه القديمة وإحلالها بخلايا جديدة أخرى حيث يتم أثناء عملية التغيير والإحلال هذه، قتل جميع الخلايا القديمة المراد تبديلها والاستغناء عنها، وذلك في عملية بيولوجية روتينية يقوم بها الجسم السليم. وعلى الرغم من السلاسة الظاهرة في تلك المهمة الروتينية، إلا أنه قد يحدث في أحيان ليست بالقليلة، ولظروف معينة مازالت تحتاج إلى كثير من الدراسة والتفسير، يحدث تغير أو انحراف جيني Genetic Mutation، ينجم عنه ميلاد بعض الخلايا الجديدة التي لا يجب أن تُولد، أو أن يفشل الجسم في قتل خلاياه القديمة المُراد تبديلها بأخرى جديدة، وتبدأ من هنا المشكلة الناتجة عن رعونة عمليات الإحلال والتبديل التي تؤدي إلى انقسامات عشوائية في خلايا تلك المنطقة المُصابة من الجسم، المارقة عن أصول وقواعد النُظم الحيوية، مُوَلدَة بهذا «بؤرة سرطانية» لا يتعدى حجمها بضعة ميكرومترات قليلة يصعب اكتشافها في تلك المرحلة المبكرة من الإصابة، وسرعان ما تنمو هذه البؤرة وتتكاثر، مكونة خلايا سرطانية Cancer Cells، تؤثر بنموها السريع على طبيعة وسلوك الخلايا المتاخمة لها في العضو المُصاب نفسه أو في خلايا أعضاء أخرى مجاورة، مما يؤدي في النهاية إلى تكون ورم Tumor سرطاني، كما هو موضح في الشكل (9 - 3).



الشكل (9-3) مراحل تطور الورم السرطاني الناشئ عن خلل بانقسامات الخلايا الحية في أحد أعضاء الجسم (المصدر: الشكل نُفذ بواسطة مؤلف هذا الكتاب)

ويتضح من هذا، أن عملية اكتشاف وتحديد بؤر الخلايا السرطانية وانقساماتها خلال المراحل المبكرة من الإصابة تُعد مسألة صعبة تقنيا، وذلك نظرا لصغر أحجام تلك البؤر التي تفوق دقة الأجهزة المستخدمة في اكتشافها، ومن ثم فإن تلك الخلايا الصغيرة حجما والمتواضعة كمّا تكون عادة خارج نطاق دقة الأجهزة، ولذلك لا تُدرك ولا تكتشف إلا بعد أن تكون قد تكاثرت وزادت نسبة وجودها. وليس ثمة شك في أن الكشف المبكر عن السرطان يمثل خطوة مهمة وأساسية في العلاج، نظرا إلى أن معظم الأورام السرطانية لا يُكشف عنها إلا في حالات متأخرة عندما تصل أحجامها إلى أحجام ضخمة تحتوي على عدة ملايين من الخلايا السرطانية، استفحل انتشارها بالعضو المصاب من الجسم.

وقد أتاحت تكنولوجيا النانو آفاقا جديدة وإضافات فريدة لعمليات التشخيص المبكر للسرطان من خلال فئة متقدمة من المواد تُعرف باسم البلورات النانوية Nanocrystals التي يُطلق عليها أيضا اسم «النقاط الكمية Quantum Dots» لأشباه الموصلات (مثل الكادميوم سلينيد CdSe أو الكادميوم سلفيد CdS، وغيرهما) والتي يتم تحضيرها على هيئة حُبيبات كروية الأشكال ذات أبعاد متجانسة، تتراوح أقطارها بين 2 و10 نانومترات. ونظرا إلى تدني أحجام تلك البلورات النانوية، فإنها تسلك سلوك الذرة الأحادية، مما يؤهلها للتمتع بخواص بصرية وموصولية متميزة، لا تمتلكها أي مادة أخرى لأشباه الموصلات. ومن أجل الحصول على خواص بصرية أفضل ولضمان عدم تعرض خلايا الجسم للتسمم بهذه المواد المعروفة بشدة السُمية، فإن حبيبات البلورات النانوية تُغلف بطبقتين، الطبقة الأولى مكونة من سلفيدات الزنك ZnS، أما الطبقة الخارجية للحبيبة فهي مكونة من مادة السيليكا SiO_2.

هذا ويتم تحميل بروتينات PEG الأجسام المضادة الخاصة بالخلايا السرطانية - يتم تحضيرها معمليا بكل يسر - على الأسطح الخارجية لتلك الحبيبات كي تعلق بها وتترسب على أسطحها الخارجية. لذا، عند

حقن المصاب بمحلول يحتوي على تلك الحبيبات، فإن الأجسام المضادة المُشتقة من بروتينات الخلايا السرطانية والعالقة بسطح الحبيبات تقوم بدور المرشد في توجيه الحبيبات إلى مواقع الخلايا السرطانية بالجسم دون غيرها من الخلايا غير المصابة. ومن ثم، فعند تعريض الجسم لموجات من الأشعة تحت الحمراء باستخدام تقنية الليزر، يعمل هذا على إثارة تلك الحبيبات الموجودة بالخلايا السرطانية فتتوهج معطية بذلك صورة خريطة محددا عليها وبأعلى دقة أماكن تواجد الخلايا السرطانية وانتشارها بالعضو المُصاب، مهما بلغ صغر هذه الخلايا أو قلت أعدادها. وقد كان لهذه الفئات المستحدثة من المواد النانوية أعمق الأثر في إحراز تقدم هائل في التصوير الجزيئي Molecular Imaging للكشف المبكر عن الأورام الذي يشهده عالمنا اليوم، خاصة في الكشف عن الأورام السرطانية المبكرة في الثدي.

الأدوية والعقاقير النانوية

تتصدر اليوم العقاقير الطبية، المركبة من حبيبات نانوية تقل مقاييس أبعاد أقطارها عن 20 نانومترا، رأس قائمة الأدوية والعقاقير الطبية من حيث الكفاءة والأمان. وقد تم تصميم المواد النانوية الخاصة بتلك العقاقير كي تتلاءم مع الأحجام المختلفة للجزيئات الحيوية Biomolecules الموجودة بالجسم، وكذلك مع أحجام الفيروسات والبكتيريا التي يُصاب بها الجسم. وتعتمد الأدوية النانوية في أداء مهامها، على صغر أحجامها الذي يمنحها ميزة التخفي عن جهاز المناعة Immune System بالجسم، الذي يقاوم وجود أي أجسام دخيلة عليه، فينقض عليها ويهاجمها بواسطة جنوده من الأجسام المضادة Antibodies. ومع التقدم المستمر في إنتاج تلك الفئة من المواد الذكية، فإن صناعة الدواء المعتمدة على تقنيات تكنولوجيا النانو قد بدأت منذ فترة وجيزة في تقديم أدوية وعقاقير طبية فريدة تتوافر فيها المزايا التالية:

- زيادة في نسبة التوافر البيولوجي [3] للدواء.

- تقليل نسبة سمية الدواء، وذلك من خلال تمكين الدواء من الوصول بصورة مباشـــرة إلى الخليـــة المصابة بعينها، مـــن دون المكوث طويلا في محطات أخرى بالجسم.

- تحسين في توزيع المادة الفعالة للدواء بخلايا الجسم المصابة.

- التحكم في معدل خروج المادة الفعالة للدواء من خلال تصغير أقطار مســـام الكبســـولات المغلفة لـــه، مما يعني زيـــادة في فعالية الدواء، وتخفيض كمية الدواء اللازمة، وأيضا تقليل عدد الجرعات المطلوبة للشفاء.

وتُعـــد العقاقيـــر الطبية المؤثرة على الحالة النفســـية للإنســـان كمضادات الاكتئاب مثالا جيدا لشـــرح ميكانيكية عمل تلك الحبيبات الدقيقـــة المُكونـــة للعقار الطبي فـــي العمل تحـــت مختلف الظروف ومتناقضات الحالة المزاجية للإنسان، فمن المعروف أن الاكتئاب ينتج عادة عن تغيـــر في تركيزات جزيئات ناقلات الإرســـال العصبية [4] بشـــكل مفاجئ لتصبح عالية التركيز مثـــلا، وتعمل الحبيبات النانوية المكونة لمضـــادات الاكتئـــاب [5] بالتركيز على تلـــك الظاهرة ورصد التغيرات المصاحبة لها، وذلك من خلال الهيمنة على جزيئات ناقلات الإرســـال العصبية المتجهة من وإلى المخ، فتعمـــل على إتلاف الزائد منها وإعاقة مسارها، وبذلك يقل تركيزها لتصبح دائما عند مستوى التركيز الطبيعي بما يتحقق معه ثبات الحالة النفسية واعتدال المزاج العام للمريض.

وبعيدا عن علاج الحالة النفسية للإنسان ولكن باستخدام فلسفة علاجية مشـــابهة، تتحقق اليوم نتائج مبشـــرة في مكافحة الفيروس HIV المسبب لمرض فقدان المناعة المكتسب الذي يتم اختصاره باللغة الإنجليزيـــة فيعـــرف باســـم AIDS، وذلك عن طريق تعطيل مســـار الفيـــروس ومنع نفاذه إلى خلايا كرات الـــدم البيضاء حتى لا يهيمن عليها جاعلا إياها مَعَامل مســـخرة لإنتاجه. ويعتمد نجاح هذه المهمة على صغر أحجـــام حبيبات المواد الكيميائية المســـتخدمة في تركيب العقاقير الطبية الخاصة لمكافحة هذا الفيروس الشرس.

توصيل الدواء

من المعروف أن نجاح أي عقار طبي يعتمد أساسا على طريقة تعاطيه وميكانيكية توصيله إلى الجزء المُعتل داخل جسم المريض، وذلك في أقل مدة زمنية ممكنة وبأقل تأثيرات جانبية محتملة، لذا فليس من الغريب أن تتنافس شركات الأدوية المختلفة في احتكار طرق فريدة معنية بتوصيل الدواء داخل جسم الإنسان وأن تهمين تلك الشركات على تقنيات وصول جزيئات الدواء إلى المكان المراد من دون تعثر أو خلل في التوجيه. ويعد رفع قيمة التوافر الحيوي لأي دواء من الأمور الصعبة التي لا تتأتى عن طريق زيادة نسبة جزيئات المواد الكيميائية الداخلة في تركيبه أو زيادة الجرعة التي يتعاطاها المريض، لأن هذا يؤدي إلى زيادة في نسبة سميته مما ينجم عنه عواقب وخيمة.

وتعد تكنولوجيا النانو المعول الرئيسي المستخدم لتطوير منهاج العقاقير الطبية والأدوية من خلال زيادة نسبة توافرها الحيوي بالدم وذلك عن طريق استحداث أساليب مبتكرة. وتقوم تلك التكنولوجيا بتقديم حلول ونماذج مبتكرة ومتقدمة أدت إلى نجاحات كبيرة ومتقنة في عمليات توصيل ونقل الدواء Drug Delivery، المتمثلة في رفع القدرة على نقل جزيئات المادة الكيميائية الفعالة للدواء إلى خلية بعينها من خلايا الجسم دون غيرها نقلا مباشرا وفي أقل فترة زمنية. فعلى سبيل المثال، يتم تصميم وإنتاج كبسولات من البلمرات مسامية التركيب Porous Polymer حيث تحتوي جدرانها على عشرات الآلاف من الفجوات المسامية التي تسمح بدخول جزيئات مادة الدواء لتستقر داخلها. وعند تناول هذه الكبسولات وبمجرد وصولها إلى العضو المعني أو المكان المراد علاجه بالجسم، فإن الكبسولة تبدأ في الانقسام إلى أجزاء صغيرة ثم إلى جزيئات أصغر فأصغر. ونظرا لوجود حبيبات المادة الكيميائية للدواء داخل نسيج تلك الكبسولات، فإنها لا تخرج دفعة واحدة وإنما تتسرب وتنطلق من مخابئها المسامية بمعدلات زمنية محسوبة Time-relcased Drug، مما يتيح للمريض أن يتعاطى كبسولة واحدة منها فقط طوال المدة الزمنية المقررة للعلاج بدلا من تعاطيها يوميا لعدة مرات. وتُعرف هذه الأدوية المتاحة الآن باسم العقاقير الطبية ممتدة المفعول.

ومثال آخر، تلك الحبيبات النانوية لأكسيد الحديد الأسود المغناطيسي Fe_3O_4 التي يتم خلط نسبة وزنية منها مع حبيبات المادة الفعالة للدواء بحيث يتم شحنهما معا داخل كبسولة مُصنعة من البولمر مسامي التركيب. وبمجرد تناول المريض لهذه الكبسولة يقوم الطبيب بتعريض منطقة الجسم الخارجية والتي يقبع تحتها العضو المراد علاجه لمجال مغناطيسي وذلك عن طريق استخدام جهاز يدوي صغير، يشبه فأرة الكمبيوتر، يؤثر على الحبيبات المغناطيسية الموجودة بداخل الكبسولة، مُسببا لها اهتزازات تعمل على إرغام حبيبات مادة الدواء على الخروج من خلال الفتحات المسامية للكبسولة وتقديم جرعة دوائية محلية الموضع للجزء المصاب بالعضو، تماما وكأننا قد قمنا بعملية حقن موضعي للعضو الداخلي!

ويجري العمل في هذه الآونة، على تأهيل عدد من المواد النانوية الجديدة كي يتم توظيفها في علاج حالات أكثر تعقيدا وأشد صعوبة وهي الخاصة بالخلايا العصبية. ومن المرجح أن تنجح المحاولات والأبحاث، الخاصة بزراعة تلك المواد بالمخ والاعتماد على صغر أحجامها، في أن تخدع الحاجز الدماغي الدموي [6] لتتسلل من خلاله حيث تمكث به محرزة الهيمنة الكاملة على نشاط خلايا الدماغ وتحفيزها كهربيا من خلال إطلاق موجات عصبية Neurotransmitters لها القدرة على علاج بعض من الأمراض العصبية المستعصية مثل الزهايمر والشلل الرعاش.

كذلك أدى التطور المستمر والسريع في بحوث طب النانو إلى ابتكار أنواع متطورة من المستحضرات الطبية المذيبة للتجلط الدموي، والتي تتألف من حبيبات نانوية متناهية في الصغر تكون قادرة على اختراق الحاجز الدماغي الدموي وخداعه، حيث تذهب مباشرة إلى المخ لتستقر داخل شرايينه، مما يتيح لها التعامل المباشر مع تلك الجلطات الدموية وإذابتها إذابة موضعية من دون أدنى تدخل جراحي.

طب النانو: سلاح البشرية لدحر السرطان

- **الطرق التقليدية المستخدمة لمكافحة السرطان**

من المؤسف تأكيد أن معدلات الوفاة العالمية الناجمة عن الإصابة بمرض السرطان لم يطرأ عليها أي تحسن أو تغيير كبير، فظلت تقريبا كما هي منذ بداية العقد الخامس من القرن المنصرم. ومن المحزن أيضا معرفة أن هذا المرض مازال

يحصد أكثر من 25 في المائة من المجموع الكلي لحالات الوفيات بالدول النامية. وعلى الرغم من التقدم الكبير الذي حققته البشـرية خلال السـنوات الثلاثين الماضية في معرفة وتحديد الأسـباب المؤدية إلى الأورام السـرطانية، فإن تلك الجهود المضنية لم تُتَرجم بعد إلى إحراز تقدم مماثل للعلاج والشـفاء النهائي من المرض. فكما هو معروف، فإن الطرق التقليدية المُستخدمة لمعالجة الأورام السـرطانية إما أن تكون عن طريق التدخل الجراحي، وإما عن طريق العلاجين الكيميائي Chemotherapy، أو الإشعاعي Radiotherapy.

وغنـي عن التوضيح، أن الأجزاء المصابة بالأورام السـرطانية تكون أكثر حساسية للحرارة وذلك إذا ما قورنت بغيرها من الخلايا والأنسجة السليمة بالجسم. لذا، فمنذ أواخر تسـعينيات القرن السابق استغلت تلك الخاصية في محاولات للهيمنة على الورم السـرطاني حـين ظهوره في منطقة ما من الجسـم والقضاء عليه محليا في المنطقة المصابة، وذلك عن طريق إخضاعه للتأثير الحراري بواسطة تقنية حديثة تُعرف باسم «العلاج بالتذرية الحرارية Thermal Ablation Therapy. وقـد أعطـت هذه التقنيـة كثيرا من الأمل في القضـاء على الأورام الخبيثة، حيث ثبت تفوقهـا على الطرق التقليدية المعروفـة التي دائما مـا ينتج عنها تهتك وتدمير للخلايا السـليمة المجاورة للخلايا المصابة، كما هو الحال في طريقتي العلاج الكيميائي والإشـعاعي. هذا بالإضافة إلى أن طريقة التذرية الحرارية، التي يستخدم فيها شعاع من الليزر الموجـه بدقة صوب الورم الخبيث، أظهرت نتائج مشـجعة في علاج بعض الحالات المتأخرة، والتي يكون فيها الورم قد اسـتفحل وتوغل بالجسم منتقلا إلى خلاياه الليمفاوية التي تنقله بدورها وبصورة عشـوائية وسريعة لأجزاء الجسـم كله. بيد أن اسـتخدام تلك التقنية يؤدي إلى ارتفاع حاد في درجة حرارة خلايا الجسـم، مما ينجم عنه عواقب وخيمة وتأثيرات سـيئة على الخلايا والأنسـجة السـليمة، مما يعرضهما للتهتك أو إلى تدهور حاد وفشل دائم في أداء وظائفها البيولوجية.

وعلـى الرغم من التقدم التقني في طرق وأسـاليب العلاج بهذه الطريقة، واسـتخدام مصـادر متنوعة من الطاقـة المؤدية إلى رفع درجـة الحرارة مثل الموجات فوق الصوتية ذات الترددات العالية، أو إرسال ذبذبات ترددية من خلال

المجالات المغناطيســية أو الكهربية، إلا أن هذه الجهود دائما ما تصطدم بكثير من العوامل الفنية الدقيقة مثل عدم تجانس أنسجة الجسم للموصلية الكهربية، الدقــة في اختيار أماكن مواضع الأقطاب الكهربيــة، أبعاد الخلايا وأحجامها والتي ليس من السهولة استهدافها حراريا دون غيرها من الخلايا المتاخمة لها. كل هذه المعوقات والصعاب التقنية وغيرها أثرت بصور سلبية في انتشار تلك الطريقة المتقدمة وتطبيقها على نطاق أوسع في علاج الأورام السرطانية.

لذا فقد أيقن العلماء أن أغلبية الطرق التقليدية المستخدمة حاليا - حتى الحديث منها - للفتك بالأورام الخبيثة أو الحدّ من انتشارها تؤدي في أغلب الأحيان إلى آثار سلبية حادة وتأثيرات وخيمة، ومن ثم أضحت الحاجة إلى توظيف تقنيات علاجية جديدة، تُستخدم في قهر الورم السرطاني والقضاء النهائي عليه من دون أن يؤدي ذلك إلى أي آثار سلبية، مطلبا مُلحا للمرضى والمعالجين على حد ســواء. وقد أعطت تقنيات طب النانو الكثير من الأمل في اســتهداف الأورام الســرطانية والتعامل معها وحدهــا دون غيرها من الخلايــا غير المصابة، حيث أكدت جميع النتائج التي أُجريت على حيوانات التجارب أو المتطوعين من البشر نجاح الطرق القائمة على هذه التكنولوجيا المتقدمــة في قتل تلك الخلايا الخبيثة من دون أي آثار بيولوجية وخيمة قد تطرأ على الجسم البشري في أثناء العلاج أو بعده.

• موصلات الدواء لاستهداف السرطان

قاد التقدم المذهل في بحوث علم وتكنولوجيا النانو إلى ابتكار أنواع متميزة من موصلات الأدوية المتخصصة في قهر وإزالة ما يُعرف بســرطان الخلايا النجمية Astrocytoma الذي يُعد أكثر وأخطر أنواع السرطانات التي تصيب خلايا المخ، والتي تُمثل أكثر من 40 في المائة من حالات الإصابة بأورام المخ، حيــث يتوغل ببطء داخل خلاياه مكونــا ورما في منطقة ما وراء العين. ومما لاشك فيه أن وجود هذا الورم في ذلك المكان الدقيق والحساس يشكل صعوبة بالغــة للأطباء في التعامل الجراحي معه أو العلاج الإشــعاعي له، نظرا إلى قصور تلك الطرق التقليدية في الاستهداف الدقيق للورم وتشعباته في خلايا المخ، مما يؤدي غالبا إلى استئصال أو إتلاف خلايا سليمة مجاورة.

هذا وقد وافقت إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية U.S. Food and Drug Administration (FDA) في العام 2005 على التصريح باستخدام أحد أدوية النانو الأكثر شهرة في العالم والذي يحمل الآن اسما تجاريا ذائع الصيت، في علاج سرطان الثدي حيث يُستخدم وبنجاح منذ ذلك الحين في استهداف الخلايا السرطانية بالثدي والقضاء عليها.

• قذائف الذهب النانوية لقهر السرطان

كثيرا ما يتردد على مسامعنا في هذه الآونة، ما اصطلح على تسميته بقذائف حبيبات الذهب النانوية Nano Gold Particles وقدرتها على القضاء على الأورام السرطانية، خاصة بعد أن كُرم أحد علماء العرب المتميزين، المصري الأصل الأميريكي الجنسية وهو البروفيسور/ مصطفى السيد في العام 2008 من قبل الرئيس الأمريكي السابق، وذلك لجهوده المتميزة في توظيف حبيبات الذهب الخالص للفتك بالخلايا السرطانية. وقد ارتبطت الحبيبات الذهبية باسم القذائف نظرا لأنها تنطلق عند حقنها بالجسم مثل طلقات القذائف الموجهة لتصيب الورم السرطاني في مقتل دون غيره من الخلايا السليمة. وبالإضافة إلى هذا «المُسمى الوظيفي»، فقد أُطلق على نوع آخر من أنواعها العديدة مصطلح حبيبات الصدفات النانوية Nanoshell Particles، نسبة إلى تركيبها الصدفي الذي يشبه محارة كروية الشكل.

وليس ثمة شك في أن القذائف المكونة من تلك الصدفات الذهبية تُعد من أبرز وأهم المواد النانوية التي أفرزها الإبداع الذهني للإنسان، والتي تعكس مدى استفادة الإنسان من التراكم المستمر للخبرات والمهارات المبنية على الأسس العلمية والفلسفات المنطقية المدعمة بالتقنيات الفنية المتعددة التي اكتسبها الإنسان خلال رحلته الطويلة مع الزمان.

تحضير حبيبات القذائف الذهبية معمليا

يُنسب الفضل دائما في التطبيقات الطبية والدوائية للصدفات النانوية إلى جهود مدرسة علمية رائدة بإحدى الجامعات الأمريكية وهي جامعة رايس Rice University، التي تُعد الجامعة الأكثر شهرة على مستوى العالم في مجال تكنولوجيا النانو، وذلك على الرغم من وجود عديد من المدارس العلمية

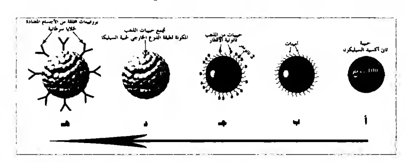
العالمية الأخرى المهتمة بالمجال نفسه. ويرجع ابتكار تلك القذائف الذهبية إلى البروفيســورة/ نايومي هالاس Naomi Halas الأستاذة بالجامعة نفسها حين تمكنت مع فريقها البحثي من تخليق حبيبات كروية نانوية من مادة الســيليكا - ثاني أكسيد السيليكون SiO_2 - ذات أقطار تتراوح بين 100 نانومتر و120 نانومترا [7]. ويوضح الشكل (9 - 4) رسما توضيحيا مبينا به كيفية تحضير حبيبات القاذفات الذهبية معمليا وفقا لطريقة البروفيسورة هالاس [7].

وكما هــو مبين في الشــكل المذكور، تخلّــق في البدايــة حبيبات من السيليكا التي تُعالج أســطحها عن طريق تحميل أمينات Amines مُخلقة لتُغطــي الســطح الخارجي للحبيبة التي يطلق عليها اســم القالب Core. ويكمن ســبب ترسيب الأمينات على الســطح الخارجي لحبيبات السيليكا في أنها تعمل على تحسين قدرة حبيبات مادة القالب على اجتذاب والتقاط حبيبــات الذهب الكروية التي لا تزيــد أبعاد أقطارها على 2 نانومتر، كي تترســب على أســطحها الخارجية مكونة بذلك طبقة ذهب حبيبية تزداد ســمكا بزيادة الفترة الزمنية المُتاحة لعملية الترســيب ليصل سُمكها إلى نحو 10 نانومترات. وتعمل الطبقة الذهبية - الدرع الذهبية - المترســبة على الســطح الخارجي لحبيبات السيليكا على امتصاص موجات الطاقة الضوئية المُوجهة إليها عند طول موجي تبلغ قيمته 810 نانومترات.

وفور الانتهاء من تحضير القذائف الذهبية، نكون بذلك على وشك تحريك طاحونة الحرب مع الخلايا السرطانية مهما بلغ صغرها ومهما تعاظمت كثافة أعدادها، وتشعبت أماكن وجودها بالجسم. ولنفس الغرض الذي تم توضيحه سلفا، تُحضّر بروتينات الأجسام المضادة من الخلايا السرطانية حيث تُرسب على سطح طبقة الحبيبات. وبعد ذلك الاستعداد الجيد تُشحن تلك الحبيبات فــي محلول ليحقن به المُصاب، حيث تقوم الأجســام المضادة بتوجيه قذائف الحبيبات للذهاب إلى ساحة القتال، لتحتل الحبيبات أسطح الخلايا المصابة فقط، دون غيرها، كما هو موضح في الشكل (9 - 5).

وبعد مرور ساعات قليلة (نحو ست ساعات أو أقل)، وبعد التأكد من وصول هذه القذائف إلى مواقعها الاستراتيجية في قلب مواقع العدو السرطاني، يبدأ تسليط كم إشعاعي ضوئي من موجات الأشعة تحت الحمراء بطول موجي يبلغ

810 نانومترات نحـــو الأماكن المُصابة، وذلك لفترة زمنية قصيرة جدا، لا تزيد على ثلاث دقائق. وبمجرد امتصــــاص حبيبات الذهب النانوية المكونة للطبقة الخارجية للقذيفة الضوء المُســلط عليها ، القادم من الأشـــعة تحت الحمراء، تتحول الطاقـــة الضوئية المُمتصة بها إلى طاقـــة حرارية، حيث ترتفع درجات حرارة أســـطحها الخارجية لتصل إلى نحو 42 درجة مئوية، تكون كافية تماما لتكوي وتحرق - إن جاز التعبير - كل الخلايا الســـرطانية المصاب بها العضو، وتدميرها بنجاح كامل، وصلت نسبته إلى 100 في المائة!



الشـكل (9 - 4) : رسـم توضيحـي يبين الخطـوات المعملية المتبعة فـي تحضير حبيبات الصـدف الذهبية المسـتخدمة كقذائف قاتلة لدحر الأورام السـرطانية فـي مراقدها بكفاءة وأمـان. ويتم فـي عمليات التحضير تجهيز حبيبات من السـيليكون لتكون على هيئة كُريات صغيـرة ذات أقطـار لا تزيـد على 100 نانومتـر (أ). ثم تأهيل أسـطحها الخارجية كي تكون قـادرة علـى جذب وترسـيب حبيبات الذهـب النانوية، وذلك من خلال تعليق وشـبك أمينات علـى تلـك الأسـطح (ب)، بعد ذلك تتم عملية ترسـيب كريـات الذهب النانوية على أسـطح حبيبـات السـيليكا حيث تلتقط الأمينات تلك الحبيبـات التي لا تزيد أبعاد أقطارها على 2 نانومتر(جـ). وبزيادة زمن العملية تتراكم الكريات الذهبية على الأسطح الخارجية لحبيبات السـيليكا مُكونـة بذلـك دروعـا ذهبية علـى هيئة طبقات رقيقـة يتـراوح سـمكها بين 2 و20 نانومتـرا (د). وبعـد ذلك نسـلح تلك المدرعـات الذهبية من خلال تحميل بروتينات أجسـام مضادة لخلايا سرطانية (على شكل حرف Y في الشكل هـ) تُحضَّر معمليا حيث تُوظف تلك الأجسـام لتقـوم بعمل الربان أو المرشـد فـي توجيه تلك القذائف إلـى مكامن وجود الخلايا السرطانية بالجسم (المصدر: الشكل تم تصميمه وتنفيذه بواسطة مؤلف هذا الكتاب، وذلك وفقا لما قامت به هالاس من تجارب رائدة).

وتدور الآن المنافســـات العلمية الشـــريفة بين مختلف المـــدارس العلمية المهتمة بهذا الموضوع، حيث تجري دراســـة وبحث إمكانية امتصاص حبيبات الذهـــب للضوء القادم بموجات طولية لها قيم أعلى مما هي عليه الآن. ومع

تطوير سـمك الطبقة الذهبية الخارجية وتعديـل مقاييس أقطار الحبيبات الذهبية المُكونـة للدروع الخارجية من القذائف، فإن هذا سـوف يؤدي إلى زيادة في قدرة الحبيبات على التعامل مع بؤر سرطانية تقع بعيدة عن سطح الجلد؛ لذا فمن المرجح أن يتم الكشف قريبا عن توظيف هذه التقنية في قتل الكيانات السرطانية الموجودة بخلايا أعضاء الجسم، مثل الرئتين والكبد.



الشكل (9 5) صورة مجهرية لعينة أخذت من ثدي مُصابة[8] توضح وجود خلايا سرطانية (منطقة يمين الصورة) متاخمة لخلايا الثدي السليمة (منطقة يسار الصورة)، وتقوم قذائف الحبيبات الذهبية (الحبيبات كروية الشكل الموجودة على أسطح الخلايا السرطانية) التي سبق تحضيرها ودعم أسطحها الخارجية بالأجسام المضادة (انظر الشكل «5-5») باستهداف الخلايا المصابة وحدها فتتوجه إليها. وبمجرد وصول تلك الحبيبات إلى «مهابطها» على السطح الخارجي للورم تُعرَض لمصدر ضوئي له القدرة على اختراق جسم الإنسان (موجات من الأشعة تحت الحمراء بواسطة مصدر خارجي من أشعة الليزر) فتبدأ حبيبات القذائف الذهبية بامتصاص تلك الأشعة مما يرفع من درجات حرارتها لتصل إلى نحو 42 درجة مئوية، ناقلة تلك الحرارة إلى سطح الورم السرطاني فتقضي نهائيا عليه (تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).

ووجود تلك النسبة الضئيلة جدا من الحبيبات الذهبية داخل الجسم بعد الانتهاء من مهامها القتالية لا يسبب أي مشاكل صحية على الإطلاق، وذلك لأن فلز الذهب يتوافق مع الأوساط البيولوجية بجسم الإنسان ولا يسبب وجوده بالجسم أي مشاكل تتعلق بالتسمم، لذا فهو صديق بيولوجي للإنسان الذي يستعين به منذ قديم الأزل في مجال طب الأسنان.

وعلى الرغم من أن النتائج المُشار إليها هنا قد تم الحصول عليها من اختبارات معملية متعددة أُجريت على فئران المعامل التي زُرعت خلايا سرطانية في أعضائها، فإن من المنتظر في خلال الأعوام الثلاثة القادمة أن يواصل العلماء جهودهم في تلك التجارب المهمة باستخدام حيوانات معملية أخرى مثل الأرانب ثم القردة. ونكون بذلك قد قطعنا شوطا كبيرا فيما قبل الاختبارات السريرية المُنتظر إجراؤها على البشر بعد سنتين من الآن على الأكثر.

طب النانو والداء السُكري

يمثل داء السُكري، خاصة النوع الثاني [9] منه، مشكلة كبيرة تتزايد خطورتها سنة بعد الأخرى وذلك نتيجة للعادات الغذائية الخاطئة وقلة الحركة، مما أدى إلى تفشي وباء السمنة وارتفاع أعداد المصابين بهذا الداء في جميع أرجاء العالم، خاصة عند الأطفال والمراهقين. ويُعد هذا الداء هو السبب الرئيسي لفقدان البصر عند البالغين الذين تتراوح أعمارهم بين 20 و74 عاما، والمسؤول الأول عن أمراض الفشل الكلوي لتلك الفئة العمرية. ويؤدي هذا الداء في كثير من الأحيان إلى مشاكل خطيرة في القلب، كما يُضاعف من خطر الإصابة بالذبحات الصدرية والسكتات الدماغية. ويمثل هذا النوع من الداء السكري خطورة كبيرة، حيث إن المصاب به لا تظهر عليه أي أعراض خلال المرحلة المبكرة من الإصابة، لذا فغالبا ما يُكتشف بمحض المصادفة، مما يؤدي إلى مضاعفة الآثار الجانبية المترتبة على الإصابة به وتأخر العلاج.

وقد أسهمت تكنولوجيا النانو إسهاما كبيرا في توفير طرق التشخيص الفعالة والدقيقة القادرة على تحديد ورصد الجينات المرتبطة بالداء السكري من النوع الثاني، والتمييز بينها وبين جينات النوع الأول من الداء. وقد أدى هذا إلى توفير طرق متقدمة للفحص متاحة الآن وعلى المستوى التجاري بمعامل التحاليل المتخصصة،

مما يزيد من مقدرة المعالجين على وصف الدواء السـليم المرتبط بالحالة، الأمر الذي يقصّر الفترة الزمنية المطلوبة في العلاج. وتُجرى الآن الأبحاث على تقديم صيغ كيميائية مركبة من حبيبات نانوية تحتوي على الأنسولين ومُصَممةً بحيث تكون قادرة على عبور كل الحواجز الفسيولوجية الموجودة بالجسم وذلك من أجل تقديم جرعات فعالة من العقاقير الدوائية بصورة فعالة وسريعة.

هذا وقد تحقق أخيرا النجاح في تصنيع حساسات عضوية Biosensors متناهية الصغر تستشعر وقوع أي انخفاضات حادة في مستوى نسبة الغلوكوز بالدم. وتوضع تلك الحساسـات في كبسـولات ميكرومترية مصنوعة من البلمر مسـامي التركيب بحيث يتم تثبيتها على سطح أي منطقة بالجسم. وعند الخطر وبمجرد هبوط مسـتوى الغلوكوز بالدم تقوم تلك الحساسات بإرسال إشارات معينة إلى الهاتف النقال الخاص بالمريض الذي يأخذ على الفور جرعة من الأنسـولين. وتُجرى الآن تجارب تطوير هذه الحساسـات بحيـث تضاف خزانات صغيـرة تحتوي على جرعة من الأنسـولين تُحقن داخل الجسـم من خلال إبرة تتصل بالخزان فتقوم بضخ الجرعة الملائمة بناء على إيعاز من الحساس. ويمثل نجاح تلك التجارب أملا كبيرا يتعلق به مئات الملايين من البشر المصابين بالداء السكري.

أمراض القلب والأوعية الدموية

على الرغم من وصول البشـرية إلى قرب نهاية العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، فما زالت أمراض القلب هي الهاجس الأكبر والمسؤول الأول عـن نحو 50 في المائة من الوفيات حـول العالم. ومن المعروف، أن السبب الرئيسي وراء أمراض القلب يرجع إلى تكوّن طبقات من الدهون على الجـدران الداخلية للأوعية والشـرايين الناقلة للدم، مما يؤدي إلى نقص فـي مرونة تلك الأوعية وتصلبها، كما يـؤدي إلى نقص كمية الدم المحمل بالأكسـجين الواصل إلى خلايا وأنسـجة أعضاء الجسـم، وهذا بالتبعية يعمـل على زيادة ضغط الدم. ومازال الغموض وعدم الدراية يخيمان حتى الآن على معرفة الأسباب الرئيسية المؤدية إلى عدم استقرار تلك الطبقات الدهنية وتعرضها للتكسير المفاجئ مسببة معها مشاكل خطيرة ينجم عنها حدوث الجلطات الدموية وانسداد الأوردة والشرايين الدموية.

وتتركـز الآن جهود الباحثين في تحديد الأسـباب الجينية المؤدية إلى تراكم تلـك الطبقات الدُهنية الخطيرة على جـدران الأوعية الدموية وذلك من خلال برامج بحثية مكثفة تعتمد على توظيف الكُرات الحبيبية لبلورات أشباه الموصلات النانوية (النقاط الكمية)، وكذلك الحبيبات النانوية للمواد المغناطيسية في عمليات الكشـف المبكر عن تراكم تلك الطبقات [10]. وفي نفس الإطار صُنّع أخيرا نوع جديد من الحساسات البيولوجية تُسـمى بالمنار الجزيئي Molecular Beacon تتراوح أبعادها من 4 - 5 نانومترات يتم إدخالها إلى جسـم الإنسـان عن طريق حقنه بها، فتبحر مع الدم سابحة في أوعيته وشرايينه، حيث تقوم بدور المراقبة لرصد النوع الجيني بالجسم المسؤول عن ترسيب الدهون، ويتم نقل هذه البيانات عن طريق إشـارات وومضات تسجل على أجهزة متابعة خارج الجسم [11]. ومن ثم تتم مراقبة تلك الجينات وتتبع سلوكها ورصد ميكانيكية تكوّن طبقات الدهون على جدران الأوعية الدموية، وذلك بهدف تحديد الأسلوب الأمثل والفعال الذي يجب اتباعه لإعاقة تلك الجينات عن تأدية عملها هذا.

ومن المؤكد أن تسـهم حساسـات المنارات الجزيئية إسهاما كبيرا في وصف وتصميـم حبيبات مـواد العقاقير الطبية النانويـة وتحديد المواد الكيميائية التي يجب اسـتخدامها لإزالة طبقـات الدهون المتراكمة على الأسـطح الداخلية لجدران الشـرايين. وسـوف يؤدي التقدم في الرصد الجزيئي لجينات المرض إلى إحداث طفرة كبيرة في صناعة الدواء الخاص بإزالـة الدهون وإذابتها، بحيث تتم صياغة عدد من العقاقير الطبية تتنوع فـي أحجام حبيباتهـا وفعاليتها، بحيث توصف، وفقـا لحالة كل مصاب، والسلوك الجيني المسـبب لتراكم الدهون داخل شرايينه الدموية، وحالته الصحية وعمره. ومن ثم، فسـوف يتلاشـى مفهوم «العقار الموحد» ليحل محله «العقار الخاص» الذي يتم تصميمه وتركيبه وفقا لحالة كل مريض.

وفـي إطار الجهـود البحثية المبذولة والرامية إلـى تقليل فرص تكون الجلطـات الدمويـة داخل الأوعية والشـرايين الدموية والتـي تؤدي إلى مخاطر حدوث حالات الأزمات القلبية المباغتة وانسداد الشعيرات الدموية داخل الرئة، صُمِّمت حبيبات نانوية قادرة على التعامل مع الفبرين Fibrin ·· ـاب بالدم والذي يُعد المُكون الرئيسي للجلطات الدموية.

دعامات القلب النانوية

يلجأ الجراحون إلى استخدام ما يُسمى بالدعامات، وذلك بغرض فتح وتوسيع شرايين القلب المصابة بضيق شديد في مساحة مقطعها نتيجة التراكم المستمر لطبقات الكولسترول على جدرانها الداخلية والذي يحول دون سريان الدم المُحمل بالأكسيجين. وتلك الدعامات عبارة عن أنابيب صغيرة أسطوانية الشكل مصنوعة من فلزات حرة، تركَّب في الشريان المصاب بصورة دائمة، مما يسمح بمرور الدم من خلاله، بالإضافة إلى أن تلك الدعامات الفلزية تحول دون تراكم طبقات الدهون على الجدران الداخلية للشرايين، مما يمكن الشرايين من بناء أنسجة جديدة لأسطحها الداخلية. وعلى الرغم من وجود العديد من المشاكل التي تترتب على استخدام تلك الدعامات مثل حدوث تلوث بالدم، أو جلطة أو نزيف، فإن أخطرها يتمثل في رفض الجهاز المناعي لمادة الدُعامة الفلزية ومقاومتها بصورة دائمة، مكونا نُدبا تتراكم على الجدران الداخلية للشريان وبالتالي تُعيق سريان الدم بداخلها (11).

وقد ساهمت تكنولوجيا النانو مساهمة كبيرة في إيجاد حلول عملية للتغلب على تلك المشاكل، من خلال تغطية أسطح أنابيب الدعامات بطبقات نانوية رقيقة السمك من البولمرات. أيضا تُوظف أنابيب الكربون النانوية في إنتاج الدعامات التي تتمتع بمعاملات فائقة في المرونة والمتانة، هذا بالإضافة إلى عدم مقاومة الجهاز المناعي في الجسم لها.

تكنولوجيا النانو للوقاية من البكتيريا والجراثيم

أجرت بعض الشركات خلال السنوات الأولى من بداية هذا القرن العديد من الأبحاث العلمية المثيرة على الحبيبات النانوية لفلز الفضة لمعرفة مدى إمكانية توظيفه في مجال مقاومة العدوى وقتل الأنواع المختلفة من البكتيريا الضارة والفيروسات. وقد أشارت النتائج إلى أن الحبيبات البلورية لفلز الفضة لها قدرة مُدهشة على قتل أنواع متعددة من البكتيريا الضارة والفيروسات والجراثيم، وذلك يرجع إلى أن تصغير تلك الحبيبات إلى أقطار تقل عن 5 نانومترات يعمل على زيادة كبيرة في مساحة سطح الحبيبات، ومع تناقص أقطار الحبيبات وزيادة مساحة السطح، تتولد لدى

ذرات عنصر الفضة الموجودة بلب الحبيبات النزعة في الهجرة إلى السطح الخارجـــي للحبيبات، مما يــؤدي إلى زيادة كبيرة في نشــاطها الكيميائي، وكذلك زيادة في تفاعلها مع أكسيجين الهواء الجوي، ونتيجة لذلك، تتكون أيونات الفضة السامة التي تكون مسؤولة عن قتل الجراثيم والفيروسات.

وقد احتكرت إحدى الشركات الكورية المتخصصة في صناعة الأجهزة الكهربية والإلكترونية، تصنيع الثلاجات المنزلية المُغطاة من الداخل بطبقة رقيقة من فلز الفضة بهدف قتل البكتيريا والجراثيم التي قد توجد، وذلك من أجل حماية الأطعمة المحفوظة من التلوث البكتيري، كذلك قامت إحدى الشــركات المتخصصة في صناعة الأحذية، بوضع أليــاف نانوية من فلز الفضـــة بداخل الحذاء، وذلك من أجــل منع فطريات القدم والبكتيريا من النمـــو في أثناء فترة ارتداء الحذاء. ويمثل هذا المُنتج أهمية كبيرة لمرضى الداء الســكري، الذين يعانون بصــورة دائمة من التقرحــات والالتهابات بالقدم، تمنع الإصابة بالعدوى البكتيرية التي قد تؤدي إلى عواقب وخيمة تتمثل في حدوث غنغرينا بالقدم.

وكثيرا ما نجد بعض الثياب الرياضية المستخدمة في عمليات الإحماء والعــدو، قــد تم تطعيمها بألياف من الفضة وذلك بهدف منع أي نشـــاط بكتيري أو فطري من التكون، وتســتخدم ســوائل تحتوي على مُعلقات من حبيبات الفضـــة النانوية غيــر الذائبة في معالجة الأقطان والبوليســتر وغيرهما من الأنسجة المستخدمة في صناعة الغزل والنسيج [12].

النانو روبوت

شـــرد ذهني طويلا بعد محاضرة عن تطبيقــات تكنولوجيا النانو كنت قد تلقيتها خلال مرحلة دراســـتي للماجســتير في العـــام 1985 بإحدي الجامعات اليابانية. ورجعت بي الذاكرة إلى ما قبل ذلك التاريخ بنحو 20 سنة، حين شــاهدت وأنا في العاشرة أحد أشهر أفلام السينما الأمريكية وهـــو «الرحلة الخياليـــة Fantastic Voyage». لم أكن الوحيد الذي لاحظ هذا التشــابه الرابط بين فلســفة طب النانو وتلك الفكرة الخيالية لمؤلف ذلك الفيلم، الذي دارت أحداثه حول فريق من الجراحين اســتقلوا مركبة

على هيئـــة غواصة بحرية تم تقليصها، وهم على متنها، إلى ما دون حجم الخلية، ثم أُدخلت إلى جســـم المريض، كي تغوص وتســـبح في دماء أوردته وشـــريانه، حتى تصل في النهاية إلى مرساها بالمخ. وعند ذلك، تبدأ مهمة أعضاء الفريق الجراحي، المتقلصة أحجامهم، في إذابة تجلط دموي به!

وبرهنت فكرة تلك الرواية على تأثر مُبدعها بالمحاضرة التاريخية التي ألقاها عالم الفيزياء الأمريكي الشهير البروفيسور ريتشارد فينمان - الأب الروحي لعلم وتكنولوجيا النانو - في العام 1959، والتي تُعد حجر الزاوية لفلسفة تكنولوجيا النانو التي تفجرت مع بداية القرن الحادي والعشرين.



الشـكل (9 - 6) يوضح الشكل العلوي شـكلا افتراضيا للنانو روبوت المتوقع إنتاجه مسـتقبلا فـي أثناء إجرائه لاسـتئصال موضعـي لورم سـرطاني داخلـي. بينما يوضح الشـكل السـفلي نوعا آخر من النانو روبوت يُتوقع إنتاجه مسـتقبلا حيث يُستخدم عن طريق توجيهه إلى أحد الفيروسـات الغازية لعضو ما بالجسـم حيث يسحقه عن طريق إطلاق أشعة من الليزر بدقة عالية. من دون أن تتأثر بذلك خلايا الجسم الحاضنة لهذا الفيروس. (مصدر الصور: www.foresight.org).

وعلـى الرغم من الخيال العلمي المنعوت بالخصوبـة، في فكرة رواية فيلم «الرحلـة الخيالية»، فإنها قد حازت قبـولا واهتماما كبيرين لدى فئة عريضة من العلمـاء في جميع التخصصـات، فانكبوا على نمذجة ومحـاكاة الفكرة، وذلك من خلال تقديم مزيج متجانس لأبحاث راقية وفريدة في مجالات المواد والتكنولوجيات الحديثة مثل: المواد المتقدمة Advanced Materials، تكنولوجيا النانـو - حيوية، إنتاج وصناعة الجزيئات المسـتخدمة في إنتاج أنظمة كهربية وميكانيكية علـى المسـتويين الميكرومتـري Micro-Electrical-Mechanical Systems (MEMS)، والنانومتري Nano-Electrical-Mechanical Systems (NEMS). هذا في الوقت الذي تدور فيه الآن مناقشـات مسـتفيضة تشمل طرح سيناريوهات متعددة متعلقة بكيفية إدخال تلك الغواصات النانوية - النانو روبوت Nanorobots أو النانو بوتس Nanobots - إلى داخل الجسـم البشري، وعن موقف الأجسـام المضادة Antibodies منها. هل سيتم طلاؤها Coating بطبقـات نانوية السُـمك Nanolayer تتوافق بيولوجيا مع الجسـم لضمان عدم مقاومته لها؟ وما هو نوع وسـمك تلك الطبقات المُقترح استخدامها؟ هل سـتقوم تلك الروبوتات النانوية بتعقب الفيروسات وإصلاح خلايا الجسم من خلال تشـفيرها عن طريق وضع برامج خاصة على شـريحة إلكترونية نانوية Nanochip تُثبت عليها؟ أم هل سيتم توجيهها والتحكم في مسارها وأدائها من الخارج بواسـطة أجهزة التحكم؟ ولكن السؤال الأكثر أهمية هو المتعلق بمصير تلك المركبات النانوية بعد الانتهاء من مهامها وعن كيفية إخراجها من الجسم. هناك الكثير والكثير من الحوارات والمناقشـات العلمية المهمة والمشوقة. وعلى الرغم من صعوبة تلك المناقشات واصطدامها بعدم المعرفة في كثير من الأحيان، فإنه من المنتظر أن يُطرح الجيل الأول من النانو روبوت قبيل العام 2025.



10

تكنولوجيا النانو والأمن الغذائي

ليس ثمة شك في أن الحالة الصحية العامة لأي فرد ترتبط ارتباطا مباشـرا مع مـا يتناوله مـن غـذاء، وعليه فإن موضـوع الغذاء يعتبر مـن الموضوعات الأكثر أهمية التـي ترتبط - على الأقل مـن وجهـة نظـر تكنولوجيـا النانو - بالتطبيقـات المتعلقة بالطـب والرعاية الصحية. وقد صدقت المقولة الشهيرة، التـي نتداولهـا كثيرا، وهـي أن العقل السليم في الجسم السليم. وليس بخاف علـى القارئ الكـريم، أن مئات الملايين من شـعوب الدول النامية، يعانون أشد المعانـاة من عـدم توافر الغـذاء. ومن المحـزن والمخجل لنا أن نعلم أن أكثر من نصف وفيات الأطفال في العالم النامي يرجـع إلى نقـص الغذاء وعـدم توافر

«أتاحـت تكنولوجيـا النانـو التعامل المباشـر مـع عينات المحاصيـل الزراعيـة وإعادة ترتيبهـا علـى النحـو الذي يضمـن إنتاجية أكبر وإضافة بعض الصفات المرغوب فيها»
المؤلف

المياه الصالحة للشــرب. وعلى النقيض من هذا، تمثل وفرة الغذاء غير الصحي أيضا خطورة بالغة تؤدي بلا شــك إلى آثار سلبية وخيمة على صحة الإنسان.

لــذا، فقد جاءت هذه القضية المهمــة ضمن أهم القضايا التي توليها تكنولوجيــا النانو كل الاهتمام، خاصة أن تلك التكنولوجيا المتقدمة تمتلك الأدوات والقــدرات على حل القضايا المتعلقــة بتوفير الأمن الغذائي، من خــلال تغيير وتطوير التكنولوجيات المســتخدمة في قطــاع الزراعة، مثل تحســين خصوبــة التربــة الزراعية ورفــع قدرتها على إنتــاج المحاصيل والحبــوب المختلفة. وقد كان لهذا الاهتمام المتزايد أبلغ الأثر في تشــجيع أكثر من 600 شــركة من الشــركات المتخصصة أو ذات الصلة بالمجالات الزراعيــة وتصنيع المواد الغذائية في الاســتثمار في مثــل هذه المجالات الحيوية المرتبطة بصحة وأمن الإنســان وسلامته. وتمثل الولايات المتحدة الأمريكية وتليها اليابان ثم الصين أكبر الدول الرائدة في مجالات توظيف تكنولوجيــا النانو في الزراعة وتصنيع المنتجــات الغذائية ومعالجتها [1]. هذا وينتظر أن يصل عدد هذه الشركات إلى أكثر من 1000 شركة خلال السنوات الثلاث المقبلة على الأكثر.

تكنولوجيا النانو والغذاء

تعد تطبيقات تكنولوجيا النانو المتمثلة في تحسين منتجات الصناعات الغذائية ورفع قيمتها وجودتها، أحد أهم التطبيقات الحديثة المهمة المرتبطة ارتباطا مباشــرا بمجال الرعاية الصحية للإنســان وسلامته وحمايته من الأمراض والمخاطر الناجمة عن عشــوائية تناول الطعام. ومن المؤسف أن تتجلى هذه المشكلة بكل آثارها السلبية الخطيرة، في منطقتنا العربية. فقد أدت العادات الغذائية المتوارثة لدينا، إلى أن تعاني فئات عريضة من أفراد شعوبنا العربية، في مختلف الأعمار، من زيادة الوزن والسمنة المفرطة، مما أدى إلى زيادة مخيفة في نسبة المصابين بداء السكري، وارتفاع ضغط الدم المزمن، وتأثير ذلك في ســلامة وصحة القلب والشرايين، والكبد والكلى. والأمــر لا ينحصر فقط في منطقتنا العربية، بل تســتفحل هذه المشــكلة

وتزداد في كثير من المجتمعات الغربية، حيث بات إيقاع الحياة السريع نهجا للإنسان المعاصر، مما يفرض على الكثيرين اتباع عادات غذائية ضارة، تتمثل في تناول الوجبات السريعة ذات السعرات الحرارية العالية، الغنية بالدهون المشبعة.

الغذاء النانوي

كثر في الآونة الأخيرة استخدام مصطلح «الغذاء النانوي» Nanofood [3] في حياتنا اليومية، وتعددت أشكاله المستخدمة. وقد زادت أسماء المنتجات والمكملات الغذائية التي تضع على معلباتها وأغلفتها الخارجية عبارات تفيد بأنها أنتجت بواسطة «تقنيات تكنولوجيا النانو»، مما دفع كثيرا من المحلات التجارية المتخصصة في بيع الطعام والمواد الغذائية إلى أن تخصص لتلك المنتجات أماكن خاصة بها. وقد أضحى هذا المصطلح، منذ فترة وجيزة، بمنزلة الأمل والرجاء لفئات عريضة من البشر تعاني، حتى هذه اللحظة، الحرمان في مجال تناول الغذاء الصحي الذي يجمع بين صفات مرغوب فيها، لا تتوافر في مواد غذائية أو أطعمة أخرى، مثل المذاق الجيد واكتمال توافر العناصر الغذائية بها، وانخفاض قيمة سعراتها الحرارية.

ولعله من المفيد أن نعمد إلى تعريف هذا المصطلح الجديد علينا، والحديث على جميع المعاجم اللغوية ومعاجم المصطلحات الطبية والبيولوجية بلا استثناء. يقصد بالغذاء النانوي أي غذاء أُنتج، أو عولج في أي مرحلة من مراحل إنتاجه، المتعلقة بزراعته، وتجهيزه أو تأهيله، باستخدام تقنيات تكنولوجيا النانو المتنوعة. وتندرج تحت هذا المسمى أيضا تلك الأغذية المحتوية على إضافات مكونة من مواد نانوية، مثل الحبيبات النانوية للعناصر الفلزية الحرة من الحديد، والزنك والكبسولات الجيلاتينية ذات المسام النانوية المحتوية على تركيزات عالية من زيوت الأسماك الشهيرة «الأوميجا 3» Omega 3 ومواد الإنزيمات المصاحبة لها، التي تعمل على تشغيل تلك الإنزيمات بكفاءة ويسر مثل «الكيو10» Q10، وقد وصل عدد تلك المنتجات التكنولوجية المتاحة بالأسواق والمرتبطة بقطاع الغذاء في العام 2006 إلى أكثر من 700 منتج، بيعت بنحو 2.6

مليــار دولار [3]، ويتوقع أن تزداد تلك المبيعات خلال هذا العام (2010)، لتصــل إلى نحو 20.4 مليــار دولار [4]. ويلخص الجدول (10 - 1) أمثلة لبعض المواد النانوية المستخدمة في مجال المنتجات الغذائية، وآلية عملها داخل الجسم.

الجدول (10 - 1): أمثلة لبعض من المنتجات الغذائية المنتجة بواسطة تكنولوجيا النانو

نوع المنتج	أمثلة لأنواع المواد النانوية الداخلة في تركيب المنتج	آلية عمل المواد النانوية
المكملات الغذائية	هيــاكل جزيئية تتألــف من حبيبات نانوية لمعادن معقدة التركيب الكيميائي لهيدريــدات الســيليكا، تتــراوح أقطارهــا من 1 إلــى 5 نانومترات.	تتمتع تلــك الحبيبــات النانوية بمساحة أسطح هائلة، وذلك نظرا إلى تدني أطوال أقطار حبيباتها، ممــا يضاعف مــن مقدرتها في امتصــاص الرطوبة، وهذا يعمل على انطــلاق وتحرر أيونات غاز الهيدروجــين منهــا. وتقوم تلك الأيونات المتحررة بدور مضادات الأكسدة عالية القدرة وذلك على المستوى الجزيئي.
المشروبات الغذائية والصحية	تحتــوي علــى حبيبــات نانويــة لفلــز الحديــد الحر. تصــل أبعاد أقطارهــا إلى نحــو 300 نانومتر.	صغــر أحجام حبيبــات الحديد يــؤدي إلــى ســهولة بالغــة في امتصــاص خلايــا الجســم لها والتفاعل معها.
المواد المستخدمة في تجهيز وإعداد الأغذية	حبيبــات فلــز الفضة الحــرة التي تقل أبعاد أقطــار حبيباتها عن 10 نانومتــرات تدخــل الآن فــي طلاء أدوات القطع المستخدمة في تجهيز الأغذية بالمطابخ. كذلك تدخل تلك الحبيبات في تصنيع أغشية تستخدم لطــلاء أدوات المطبــخ والمائــدة: الأكــواب وأوانــي الطهــو وأدوات المائدة. وتســتخدم كذلك في صنع طبقات نانوية رقيقة على الأســطح الداخلية للثلاجات المســتخدمة في تبريد وتجميد المنتجــات الغذائية.	أظهــرت نتائــج الأبحــاث التي أجريت خلال العقد الماضي قدرة فائقة لحبيبات الفضة النانوية في قتل البكتيريا ومكافحة تراكمها علــى أســطح المــواد المختلفة.

نوع المنتج	أمثلة لأنواع المواد النانوية الداخلة في تركيب المنتج	آلية عمل المواد النانوية
تغليف وتعبئة المواد والمنتجات الغذائية	حبيبات السيليكا النانوية المستخدمة في دعم وتقوية البوليمرات المستخدمة في تعبئة المواد والمنتجات الغذائية.	تعمل حبيبات السيليكا النانوية على تقوية العبوات المصنعة من البوليمرات وسد الفجوات المسامية الموجودة بها وبالتالي منع جزيئات الغازات مثل الأوكسيجين في اختراق تلك العبوات، ومن ثم تساهم في زيادة العمر الافتراضي في تخزين المنتجات الغذائية وحمايتها من الأكسدة والتلف.
الحساسات النانوية	أنابيب الكربون النانوية، حبيبات الكربون بلاك النانوية فائقة النعومة (50 نانومترا).	تكشف أنابيب الكربون النانوية عن الكائنات الدقيقة متناهية الصغر، وكذلك باستشعار وجود البروتينات السامة المصاحب لتلف وفساد الأطعمة والمشروبات المحفوظة. ويقوم كذلك الكربون بلاك بالمهام نفسها، وذلك عن طريق التغير في لونه المصاحب لأي أنشطة بكتيرية يتم تعيينها.

التحكم في بنية الغذاء وإعادة صياغته

قاد التقدم الهائل في علم النانو والتقنيات الدقيقة المستخدمة في توصيف وتعيين خواص المادة عند المستوى الذري والجزيئي لها إلى تفهم عميق لطبيعة البنية النانوية للمكونات الداخلية في الأغذية، وذلك عن طريق توظيف الأجيال الحديثة من الميكروسكوبات الإلكترونية وميكروسكوبات القوة الذرية في أغراض توصيف وتعيين خواص المواد الغذائية. ومن ثم، فقد أدى هذا التفهم إلى فتح آفاق جديدة في عمليات تصنيع الأغذية، وذلك عن طريق التحكم في ترتيب ذرات المواد الداخلة في تركيب جزيئات المواد الغذائية واختيار عناصر إضافية مفيدة لمواد أخرى بغرض إدخالها في بنية الغذاء، مما يتيح رفع جودته وقيمته الغذائية معا. هذا، وقد قامت أخيرا

واحـــدة من كبريات الشـــركات الألمانية المتخصصة في إنتـــاج وتعبئة اللحوم المحفوظة، في ابتكار إضافات من حبيبات غروية لا تزيد أبعاد أقطارها على 30 نانومترا يتم تشكيلها لتكون على هيئة كبسولات صغيرة جدا، تحتوي على مكملات غذائية مثل فيتامينات «ج وهـ»، تضاف إلى هذه المنتجات بغرض رفع قيمتها الغذائية، وعدم تغيير لون أو طعم المنتج الغذائي. وكذلك وظفت بعض الأحماض الدهنية الآمنة كمـــواد حافظة لمنتجات اللحوم المحفوظة، والتي لا تســـبب عند تناولها أي مشاكل صحية. وتُستخدَم تلك الإضافات وغيرها من المـــواد النانويـــة وبأمان في قطاع تصنيع اللحـــوم المحفوظة، حيث تقوم بدور رئيسي في رفع القيمة الغذائية للمنتج، وكذلك من درجة ثبات ألوانه.

وتتنافس شـــركات إنتاج رقائق البطاطس والأطعمة المحفوظة الأخرى إلى إنتاج أنواع خاصة تحتوي على نســـب ضئيلة جدا من ملح الطعام، مع تمتعها بالمذاق نفســـه الذي تتمتع به الأنواع التقليدية ذات المحتوى الملحي المعتـــاد. ويرجع ذلك إلى أن تصغير مقاييس الحبيبات البلورية من كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) حتى تصل أبعاد أقطارها إلى نحو 10 نانومترات، يؤدي إلى زيادة مســـاحة أســـطحها التي تلامس السطح الخارجي للسان بداخل الفم، مما يؤدي إلى زيادة إحساســـه بالمذاق المالح لتلك الحبيبات، على الرغم من تدني تركيز الملح المستخدم.

وباتباع الأســـلوب نفسه، تُصغَّر أحجام حبيبات السكر، المستخدمة في صناعة الحلويات المحفوظة والمعبأة، إلى أدنى حد، وذلك بهدف إنتاج أنواع خاصة من الحلوى تتناســـب مع مرضى الســـكر أو مع أولئك الذين يتبعون برامج غذائية خاصة.

وتنتج الآن إحدى شـــركات صناعة الأغذية المحفوظة في أوروبا أنواعا خاصة من الصلصة المعروفة باســـم المايونيز Mayonnaise، بحيث تحتوي على نســـبة قليلـــة من الزيوت والمـــواد الدهنية، مـــع احتفاظها بالخواص التقليدية للمايونيز، المتمثلة في الشـــكل، القوام، اللون والمذاق. ويتم هذا، عن طريق استبدال قطرات الزيت المضافة إلى المايونيز بقطرات من المياه تغطى بطبقة رقيقة زيتيـــة. ونظرا إلى أن القطرة الواحدة من الماء تتألف مـــن مليارات جزيئـــات H_2O ذات الأبعاد النانوية، فإن هـــذا يعني توافر

مســاحات ســطحية هائلة من تلك الجزيئات المغطــاة بطبقات رقيقة من الزيت، وهذا بطبيعة الحال يؤدي إلى استخدام كميات أقل من الزيت، مما يعني انخفاضا في السعرات الحرارية للمايونيز.

وقد ظهرت في الأسواق منذ فترة وجيزة أنواع مختلفة من الزيوت النباتية المســتخدمة في طهو وقلــي الأطعمة، تحتوي على حبيبــات نانوية من مواد خاصة تعمل على تغليف الأسطح الخارجية لجزيئات الدهون الهيدروكربونية الموجودة بتلك الزيوت، بأغشية رقيقة تعوق الجسم من امتصاصها.

تكنولوجيا النانو في تغليف وتعبئة المواد الغذائية

تعــد تطبيقات تكنولوجيا النانو في تعبئة وتغليــف المواد الغذائية، أحد أهم المخرجــات التكنولوجية في قطاع الصناعات الغذائيــة التي يتزايد بها البحث والتطويــر، حيث تتم اليوم تعبئة وتغليف وحفظ ما بين 400 و500 منتج غذائي بواســطة تقنيات تلك التكنولوجيا. وتجتهد اليوم شــركات العبوات الغذائية في تصنيع عبوات تجمع في خواصها بين القوة وخفة الوزن. كما تزوَّد العبوات الغذائية بحساســات نانوية Nanosensors عن طريق غرسها بالعبوة لتعمل على مراقبة الحالة الداخلية والخارجية للمنتج الغذائي المحفوظ، وتعد هذه الحساسات بمنزلة الكواشف الدالة عن حالة الحاويات، وغرف تبريد الأطعمة والمواد الغذائية، وكذلك أماكن عرضها داخل منافذ البيع. ويتم اكتشاف أي تغيرات، ناجمة عن وجود أي نشاط بكتيري أو ميكروبي بالمنتج الغذائي، وذلك عن طريق تغيير تدريجي بألوان المواد النانوية المكونة للحساسات المستخدمة بداخل العبوات الغذائية، وذلك عند استشعارها لوجود تلك الأنشطة البكتيرية أو الميكروبية. وتتميز تلك الحساسات النانوية التي تعمل ككاشفات للبكتريا والميكروبات بحساسيتها ودقتها الفائقة عند أقل التركيزات البكتيرية أو الميكروبية.

- أغلفة النانو البلاستيكية

تنتج الشــركات الكيميائية منذ فترة وجيزة طبقات شــفافة على هيئة أغشــية نانوية متناهية الســمك تســتخدم في تغليف اللحــوم والأغذية الطازجــة. وتغرس حبيبات أو أنابيــب نانوية من مادة الصلصال الطبيعي

بداخل تلك الأغشـــية الفيلمية، حيث تعمل تلك المكونات النانوية المضافة على غلق مسام تلك الأغشية لمنع تسرب غازات الأوكسيجين أو ثاني أكسيد الكربـــون إلى الغـــذاء الطازج الموجود داخل العبـــوة، ومنع وصول الرطوبة إليه. هذا بالإضافة إلى أن تلك الحبيبات الصلصالية تعمل على تقوية تلك الأغشية الرقيقة ووقايتها من التمزق أو التلف في أثناء التداول، وهي تزيد أيضا من مقاومة الأغشية للحرارة المحيطة بالعبوة [6].

هـــذا في الوقت الـــذي تنتج فيه الآن متراكبات نانوية من البلاســـتيك، تســـتخدم كأوعيـــة أو مواعين لحفظ الأطعمة المطهـــوة، حيث تتميز، بخفة الوزن وارتفاع في قيم المتانة، مما يجعلها مواد مرغوبة تســـتخدم في إنتاج العبوات المستخدمة لهذا الغرض. من الجدير بالذكر هنا، أن تلك المتراكبات النانوية تتألف من قوالب من البلمرات، يتم التحكم في مقاييس أبعاد فتحات مســـامها، حيث تقوم حبيبات نانوية مخلقة من أكاســـيد فلزية، يتم إنتاجها والتحكـــم في مقاييس أقطارها بغلق الفجوات المســـامية لقوالب البلمرات، مما يضمن حفـــظ الأطعمة الغذائية الطازجة داخـــل تلك العبوات لفترات طويلة من دون أن تفسد أو أن تطرأ على مذاقها أو مظهرها أي تغييرات.

- **وقاية أسطح الأطعمة الطازجة من التلوث البكتيري**

تستخدم تكنولوجيا النانو كذلك في حفظ المنتجات الغذائية الطازجة مثـــل اللحوم، الفواكه والخضراوات، وكذلك منتجـــات الألبان، والحلويات والخبـــز، بالإضافـــة إلـــى الوجبات الســـريعة، وذلك عـــن طريق معالجة أســـطحها الخارجية وتغطيتها بطبقة رقيقة شفافة لا ترى بالعين المجردة، يقل سمكها عن 5 نانومترات. وتعد هذه التقنية أحد أهم التقنيات واسعة التطبيق والاســـتخدام في مجال حفظ الأطعمـــة الطازجة وإطالة فترات الصلاحيـــة لها في التخزين، حتى بعد فتح العبوة. وتمنع الطبقات النانوية المغلفة للأســـطح الخارجية للأطعمة والمنتجات الغذائية، تســـرب الغازات إلى ســـطح الأطعمة، لذلك يضمن وجودها عدم تأثـــر الأطعمة بالعوامل الخارجية المحيطة، مثل الرطوبة والإشعاعات، والتي تؤدي دائما إلى فساد الغذاء أو تلوثه.

وتتميز الطبقات الواقية المضادة للأكسدة، بكونها عناصر لمواد نانوية آمنة غير سامة، متوافقة حيويا مع الإنسان، لذا فلا تلزم إزالتها عند تناول المنتج الغذائي. وتعد الحبيبات النانوية المكونة لتلك الطبقات الرقيقة، مثل فلز الفضة وبعض أكاسيد الفلزات مثل ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2، وأكسيد الزنك ZnO وأكسيد النحاس CuO، هي المواد الأكثر شيوعا واستخداما في هذا المجال. وتتميز حبيبات تلك الأكاسيد بقدرتها على تحليل الملوثات من المواد العضوية والبكتريا، ومقاومة ودحر الميكروبات التي قد تتراكم على الأسطح الخارجية للمنتجات الغذائية خلال فترات الحفظ. وتجدر الإشارة إلى أن حبيبات فلز الفضة التي لا تتعدى أبعاد أقطارها عن 100 نانومتر تتمتع بشراهة كبيرة في التفاعل الكيميائي، وذلك لتضاعف أعداد وجود ذراتها الحرة على أسطح حبيباتها الخارجية، مما يساعد في تحولها إلى أيونات فضة عالية السمية، شديدة الفتك للبكتيريا والميكروبات.

• **أنواع جديدة من القوارير البلاستيكية**

تولي الشركات المتخصصة في إنتاج العبوات الغذائية اهتماما مضاعفا في تطوير منتجاتها من القوارير البلاستيكية المستخدمة في حفظ بعض الأطعمة والسوائل الغذائية المختلفة، لتكون على القدر نفسه من القوة والصلابة المتمتعة بهما نظيرتها المصنعة من الزجاج. وتتفوق تلك القوارير البلاستيكية بعدم تعرضها للكسر الناتج عن عدم الحيطة في أثناء التداول أو النقل. ومن أجل تحقيق هذا الهدف، تتم تقوية مادة البلاستيك بإضافة أنابيب وحبيبات نانوية من الصلصال إليها، وهذا يمنحها القوة والتفوق على القوارير الزجاجية. وتتيح تلك القوارير البلاستيكية، الاحتفاظ بالسوائل داخلها من دون التأثر بمشاكل التخزين المعروفة كالتلف، مما عمل على زيادة بقاء السوائل سليمة من دون تلف، لمدد تتراوح من 6 إلى 18 شهرا.

• **حساسات النانو**

تتيح تكنولوجيا النانو عدة وسائل فعالة يمكن توظيفها بكفاءة ودقة في مجال تعبئة وحفظ الأطعمة، وضمان توفير غذاء آمن، مرتفع الجودة، خال من الملوثات. ويتم تحقيق هذا الهدف عن طريق توظيف حساسات حيوية

نانوية الحجم تعمل للكشف السريع والدقيق عن الظواهر المصاحبة لتعرض الغذاء لأي ملوثات. ويهدف العلماء والباحثون المتخصصون في مجال إنتاج وتجهيز الأغذية ومنتجاتها، إلى دمج هذه الحساسات لتكون مكونا أساسيا في العبوات الغذائية بحيث يستطيع المستهلك العادي تحديد مدى صلاحية المادة الغذائية الموجودة بها ورصد أي تغيرات غير طبيعية قد تطرأ على الطعام نتيجة إصابته بملوث بكتيري، وذلك عن طريق ملاحظة التغير في لون الحساس الذي يظهر بلون أحمر - على سبيل المثال - في هذه الحالة.

تكنولوجيا النانو في قطاع الزراعة

- **الكيماويات الزراعية**

أصبحت المبيدات المستخدمة في مقاومة الآفات الزراعية أحد أهم المواضيع المثيرة للجدل في الآونة الأخيرة، وذلك بعد أن أثبتت البحوث والدراسات تأثيراتها الضارة على صحة الإنسان والحيوان، وآثارها المدمرة للبيئة. ويستخدم العالم كميات ضخمة من تلك المبيدات تصل إلى نحو 2.5 مليون طن سنويا، مما يؤدي إلى تلوث التربة والمياه والمحاصيل الزراعية، ويسفر عن ارتفاع نسب حالات التسمم في الإنسان والحيوان. هذا وتسبب المياه المستخدمة في ري أو في عمليات غسل التربة إلى حمل تلك المياه نسبا عالية من المبيدات الموجودة بالتربة، التي تنفذ من خلالها إلى الطبقات السفلية من التربة حيث تتخللها، متسربة في ذلك إلى الطبقات القريبة من المياه الجوفية أو إلى المياه الجوفية ذاتها.

وقد دخلت تكنولوجيا النانو بالفعل في تصنيع حبيبات الكيماويات الزراعية المستخدمة في مكافحة الحشرات والفطريات والآفات الزراعية التي تصيب التربة والنباتات والبذور. وتتميز تلك الحبيبات بارتفاع قيمة مساحة أسطحها، مما يعني ترشيد استخدامها وتخفيض الكميات المستخدمة منها. وبالتالي تقليل الآثار البيئية المترتبة.

وتقوم الشركات المنتجة للكيماويات الزراعية بإنتاج أنواع أخرى من الحبيبات النانوية، تقل أقطارها عن 100 نانومتر حيث تُستخدَم في صناعة المحاليل والمستحلبات الكيميائية الخاصة بتسميد التربة وتغذية النباتات

الزراعية. وللغرض نفسه وتماشيا مع السياسات العالمية الخاصة بحماية البيئة، بدأ الاتجاه نحو تعبئة الحبيبات النانوية النشطة المستخدمة في مجال تسميد وتخصيب التربة الزراعية بداخل كبسولات صغيرة من البوليمرات، تتميز بتحللها عند تعرضها لعوامل خارجية مثل أشعة الشمس أو عند تعرضها لوسط قلوي. وعند تحلل تلك الكبسولات، تنطلق منها الحبيبات النانوية الموجودة بداخلها لتقوم بدورها في تخصيب التربة الزراعية.

وقد فتحت تكنولوجيا النانو بذلك آفاقا جديدة في هذا المجال المهم، حيث تقوم شركات الكيماويات الزراعية بإنتاج أنواع أخرى من الكبسولات يتم التحكم في أبعاد أقطار مسامها كي تسمح بخروج حبيبات المواد الكيميائية المغذية للتربة والنبات، أو الحبيبات المقاومة للآفات الزراعية والحشرات، بمعدلات زمنية مدروسة ومحسوبة، مما يوفر التغذية والحماية للنبات بصفة دائمة ويخفض في كمية المواد الكيميائية المستخدمة. هذا وتقوم بعض الشركات بإنتاج حبيبات نانوية تتألف من أسمدة مواد كيميائية مضاف إليها مبيدات مكافحة الآفات بحيث تتم تعبئتها معا داخل تلك الكبسولات السالف ذكرها، مما يجعلها تقوم بأداء وظيفتين مختلفتين في وقت واحد.

- **الري المستدام للمحاصيل الزراعية**

تمثل الطرق التقليدية المتبعة في ري المحاصيل الزراعية فقدا هائلا للمياه التي يتبخر جزء كبير منها، يصل إلى 50% في المناطق شديدة الحرارة، مما ينجم عنه ارتفاع في نسبة ملوحة التربة يؤدي بالتالي إلى انخفاض خصوبتها. ولم يغب عن علماء تكنولوجيا النانو التفكير في وضع حلول مبتكرة لحل هذه المشكلة حيث ابتكروا طريقة فريدة تعمل على تخفيض سرعة تدفق المياه إلى التربة والتحكم في معدل جريانها السطحي من أجل تخفيض معدلات تبخرها إلى أدنى حد ممكن. وتعتمد هذه الطريقة على توظيف معدن الزيوليت للقيام بهذه المهمة الصعبة. ويعد الزيوليت أحد المعادن البلورية الموجودة في الطبيعة، التي تتكون من ثلاثة عناصر هي السيليكون والألمونيوم والأوكسيجين. وقد سمح التركيب الأسفنجي لهذا المعدن، المؤلف من مسام دقيقة وفجوات نانوية الأبعاد

في أن يمتص السوائل بما يعادل نصف حجمه! لذا فقد استُغلت هذه الخاصية المهمة وتوظيفها في مجال ري النباتات والمحاصيل الزراعية، حيث توضع تلك الحبيبات في التربة فتخزن جزءا كبيرا من مياه الري المستخدمة داخل هياكلها المسامية، لتقوم بعد ذلك بإخراجها بمعدلات بطيئة، توفر استدامة عملية ري الأراضي الزراعية.

وبالإضافة إلى ما توفره طريقة الري هذه من مزايا متعددة، تتمثل في تخفيض كميات مياه الري المستخدمة مع تخفيض المفقود من هذه الكميات نتيجة التبخير أو التسرب إلى داخل التربة، فإنها أيضا تحقق المزايا التالية:

- نمو جيد للمحاصيل الزراعية.
- تحسين كفاءة الأسمدة المستخدمة في تغذية التربة.
- زيادة في إنتاجية المحصول.
- تحسين جودة التربة ونوعيتها على المدى الطويل.
- تقليل فقدان العناصر الغذائية الطبيعية الموجودة بالتربة الزراعية.

- **إعادة ترتيب الجينات**

سعى علماء علم الأحياء الجزيئي Molecular Biology، عقودا طويلة لمحاولة الهيمنة على الجينات النباتية والحيوانية، ومحاولة إعادة ترتيبها لصياغتها على النسق الذي يتيح إضافة خواص متعددة إلى النباتات والحيوانات المستخدمة في مجال صناعة المنتجات الغذائية. لكن وعلى الرغم من تلك المحاولات الجادة فإنها كانت دائما ما تصطدم بكثير من العقبات والقيود التقنية والفنية. ومع بزوغ فجر تكنولوجيا النانو والتحامها مع التكنولوجيا الحيوية، توافرت عدة أدوات وتقنيات جديدة وقوية كانت كفيلة بتحويل تلك الأحلام إلى أرض الواقع. فقد أتاحت تكنولوجيا النانو مجموعة من التقنيات والأدوات الجديدة الخاصة للتعامل مع جينات النباتات أو الحيوانات والتلاعب بها وذلك من خلال توظيف الحبيبات والألياف النانوية وكذلك الكبسولات في نقل [7] الجينات المراد توصيلها إلى خلية ما بصورة مباشرة، بدلا من استخدام الفيروسات كناقلات Viral Vectors [8]،

وقد أدى استخدام المواد النانوية كناقلات جينية إلى زيادة في كمية الجينات أو المـــواد الكيميائية المنقولة إلى الخلايا، وذلـــك بالإضافة إلى إتاحة إمكان السيطرة على الحمض النووي، الذي يتم الإفراج عنه وخروجه من الكبسولات داخل المكان المستهدف فقط من هيكل النبات.

وقـــد أتاحت تكنولوجيا النانو التعامل المباشـــر مـــع جينات المحاصيل الزراعيـــة وإعـــادة ترتيبها على النحو الذي يضمـــن إنتاجية أكبر وإضافة بعض الصفات المرغوب فيها. فعلى ســـبيل المثال، أزاحت إحدى الجامعات في تايلند الســـتار عن نجاح باحثيها في تحســـين بعض الصفات الخاصة بـــالأرز. كما أعلنت مواصلة تلك الأبحاث الرامية إلى تطويره واســـتنباط أنواع جديدة منه يمكن أن تتم زراعتها على مدار السنة كلها [9، 10].

مجال الاستزراع السمكي وتربية الأحياء المائية

- **تخليص مياه المزارع من الطحالب الضارة**

تعد تربية الأحياء المائية واســـتزراع الأسماك، والمحار أو النباتات المائية من أهم وأنجح المشـــروعات التي يزداد نموها عاما من بعد الآخر. وتشـــير التقديـــرات إلى أن نحو 20% من الحجم الكلي للأســـماك والأحياء المائية المطروحة بالأســـواق التجارية قـــد تمت تربيتها في المزارع الســـمكية. ومن المتوقع أن تســـتمر زيادة الطلب على الأغذية البحرية لتصل نسبتها إلى أكثر من 70% في خلال السنوات الثلاثين القادمة. وعلى الرغم من هذه المؤشرات المشجعة، فما زال الكثير من المزارع السمكية، وعلى الأخص تلك المتخصصة في تربية الروبيان، تعاني من تفشي بعض الأمراض وزيادة التلوث الكيميائي في مياهها. ويعتقد الباحثون أن تكنولوجيا النانو سوف يكون لها الدور الأكبر في توفير مزارع سمكية آمنة وخالية من الأمراض والتلوث.

ويعمل الباحثون في مختبرات إحدى الشـــركات المتخصصة في المواد والكيماويات في اختبار إحدى المواد الكيميائية التي أنتجتها الشركة أخيرا لتستخدم في تنظيف مياه المزارع السمكية. ويتكون هذا العقار من حبيبات نانوية لمركبات وســـبائك عنصر اللنثانوم La التي لا تتعدى أبعاد أقطارها 40 نانومترا تتم إضافتها بنســـب معينة إلى مياه الأحواض السمكية. وقد

أشـــارت النتائج أن تلك الحبيبات بما لها من مســـاحة أســطح كبيرة قد نجحت في تخليص مياه المزارع السمكية من الفوسفات الموجود بها والذي يعد السبب الرئيسي لنمو الطحالب بمياه المزارع. ويواصل الباحثون هناك جهودهم من أجل تخفيض تكلفة المنتج والتأكد من عدم تعرض الأســـماك المستزرعة لأي أضرار من جراء استخدامه بمياه المزارع السمكية (11).

- **لقاح الحمض النووي لتطعيم الأسماك المستزرعة**

توشك الآن وزارة الزراعة الأمريكية على الانتهاء من التجارب الخاصة بإجراء تطعيم واســـع النطاق على كمية ضخمة من الأســـماك المستزرعة، وذلـــك عن طريق اســـتخدام الموجات فوق الصوتيـــة وتقنية لقاح الحمض النووي المعبأ في كبســـولات. وتتلخص هذه الطريقة في تجهيز كبسولات، تعبَّأ بأشـــرطة قصيرة من الحمـــض النووي الخاص باللقـــاح، ثم إضافة تلك الكبســـولات إلى مياه المزرعة. وبمجرد وجود كبســـولات اللقاح داخل ميـــاه المزرعة، تُعـــرَّض المياه لموجات فوق صوتية تعمل على تكســـير وفتح الكبسولات، مما يؤدي إلى تسرب الحمض النووي الموجود داخلها، ومن ثم تبدأ خلايا الأسماك في امتصاصه.



11

تكنولوجيا النانو لحماية البيئة وإزالة الملوثات

«أظهرت النتائج البحثية والميدانية التي نُفّذت على مصادر متنوعة للمياه، باستخدام المواد النانوية والأجهزة المبنية على تكنولوجيا النانو، تحسنا واضحا وكبيرا في مستوى ملاءمة المياه المعالجة للاستخدام الآدمي»

المؤلف

على الرغم من أن معظم الكوارث البيئية، مثل العواصف الموسمية والتسونامي، تقع بفعل الطبيعة، وهي بالتالي تقع خارج نطاق سيطرة الإنسان وتحكمه، فإن «التلوث البيئي» يعد إحدى أخطر المشاكل البيئية التي صنعها الإنسان. وليس غريبا أن يتصدر موضوع حماية البيئة قائمة التحديات التي يواجهها إنسان القرن الحادي والعشرين، والتي يُسخر من أجلها جميع التقنيات والتكنولوجيات الحديثة سعيا وراء إيجاد سبل مجدية لحلها. وتتمثل صعوبة وضع استراتيجية لحل كل مشكلة بيئية على حدة في الترابط البيني بين المشكلة البيئية الواحدة - كمشكلة تلوث الهواء مثلا - وعدد يصعب حصره من المشاكل الفرعية المترتبة عليها أو

المؤثـــرة فيها. ومن هنا ندرك أن موضوع البيئة هو موضوع معقد من حيث تداخـــل عدد ضخم من العوامل والمؤثرات المتنوعة فيه وتشـــابك خيوطها بعضها مع بعض. ويمثل التلوث مسألة بالغة الخطورة، وذلك لعجز حواس الإنســـان المجردة عـــن إدراك ما إذا كان ما يأكله من طعام أو يشـــربه من شراب أو يستنشقه من هواء ملوثا أو لا.

ويســـتعرض هـــذا الفصل من الكتـــاب مخرجات البحـــوث التطبيقية التـــي تمت خلال الســـنوات القليلـــة الماضية والتي أدت إلـــى تقديم عدة حلـــول ابتكارية واعدة تتعلق بمجال تكنولوجيـــا النانو وتطبيقاتها الحالية والمستقبلية في معالجة الملوثات البيئية في الماء والتربة، وكذلك في الهواء، وتصفيتها وتجنب حدوثها مرة أخرى.

عوامل التلوث البيئي

أدت الزيادة العشوائية في القطاع الصناعي بكل دول العالم، وعلى الأخص بالـــدول النامية، حيث يقل فيهـــا الوعي البيئي ويتراخى بهـــا تنفيذ القوانين الصناعية الصارمة المتعلقة بحماية البيئة، إلى زيادة غير مطمئنة في تركيزات عناصر المخلفات الصناعية في البيئة التي يعيش فيها الإنســـان. يتلوث الهواء بأنواع من الأبخرة الكيميائية الســـامة، هذا بالإضافة إلى ما يحمله من أدخنة وعوادم وحبيبات دقيقة ناتجة عن أنشـــطة الإنسان والعمليات الصناعية التي يقـــوم بها، وذلك على مســـتوى المناطق الصناعية فـــي العالم. ويمكننا حصر الملوثات الأكثر شيوعا في الهواء الجوي على النحو التالي:

- أول وثاني أكسيد الكربون.
- الكلوروفلوروكربون.
- عناصـــر ومركبـــات الفلزات الثقيلـــة مثل الخارصـــين، الكروميوم، الرصاص، الزئبق والزنك.
- المركبات الهيدروكربونية.
- أكاسيد النيتروجين (1).
- مركبات المواد العضوية سريعة التطاير، الديوكسين.
- ثاني أكسيد الكبريت.

حيث تمثل عمليات حرق زيت البترول، والفحم والغاز، من أجل توليد الطاقة لمولدات القوى الكهربية، أكثر من 95 في المائة من مصادر غازات أكاسيد النيتروجين بالهواء الجوي.

ومع الزيادات المخيفة لمعدلات النمو السكاني الذي يشهده العالم اليوم، خاصة في البلدان النامية والفقيرة، ترتفع كميات الملوثات الصلبة، السائلة والغازية التي تلوث البيئة المائية والتي تنجم عن أسباب مختلفة هي:

- مياه الصرف الصحي.
- استخراج وحرق الوقود الأحفوري.
- تسرب وانسكاب النفط.
- صرف الأسمدة والمبيدات الزراعية.
- صرف المخلفات الصناعية.

ويعد مجال حماية البيئة وإزالة الملوثات البيئية من بين أبرز المجالات التطبيقية التي توليها تكنولوجيا النانو اهتماما كبيرا، وذلك نظرا إلى شدة الترابط بين صحة الإنسان والظروف البيئية التي يعيش فيها. ومن المرجح أن تؤدي زيادة قدرة الإنسان التقنية ومهاراته المتعلقة التحكم والهيمنة على خواص المادة والتلاعب بذراتها وبنيتها الداخلية، إلى ابتكار مواد نانوية جديدة وأنظمة حديثة وأدوات فعالة تؤدي إلى حماية البيئة من خلال المحاور التالية:

- تنظيف البيئة وتخليصها من تراكمات الملوثات البيئية على مدار السنوات السابقة.
- تطوير وتحديث الطرق والأنظمة المستخدمة حاليا في إزالة الملوثات ومراقبتها.
- ابتكار أنظمة تنبؤ حديثة بهدف الحماية المستقبلية من أي مشاكل بيئية.
- إنتاج مواد نانوية متقدمة وتقديم طرق فعالة ورخيصة للحصول على الطاقة النظيفة.

تكنولوجيا النانو لتنقية المياه

غني عن الشرح والبيان، مدى ما يمثله الماء من أهمية بالغة للإنسان، وأن العجز في توفير مصادر آمنة ونظيفة للماء، لن يؤدي فقط إلى تدمير صحة الإنسان، وإنما سوف يؤدي إلى تدمير الحياة كلها على سطح هذا

الكوكب الذي نعيش عليه. ومما لا شك فيه أنه أدت عمليات صرف المخلفات غير المُعالجة، الناتجة عن العمليات الصناعية، إلى المصادر المائية التي نعتمد عليها في توفير احتياجات استخداماتنا اليومية من الماء إلى زيادة مخيفة في أعداد المصابين بأمراض الكبد والفشل الكلوي. هذا وقد اعتُبِرَت تلك المخلفات أحد الأسباب الرئيسية للإصابة بالسرطان، حيث إنه من المعروف أن تلك المخلفات الصناعية تحتوي على نسب عالية التركيز لفلزات المعادن الثقيلة مثل الزئبق، الزرنيخ والرصاص، بالإضافة إلى ما تحتويه مكونات تلك المخلفات غير المُعالجة على مركبات كيمائية ضارة.

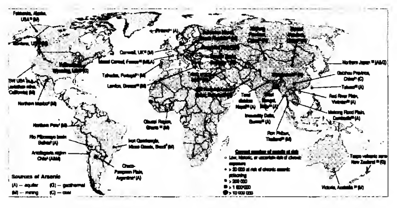
وقد أدت عمليات صرف المياه المستخدمة في ري المزروعات، التي تتسم باحتوائها على نسب عالية من المبيدات الحشرية السامة والأسمدة ومخصبات التربة، صرفها إلى التربة أو إلى الأنهار وتسربها إلى مصادر المياه الجوفية، في زيادة نسب تلوث المياه، مما يُصَعب من مهام عمليات تنقية المياه ومعالجتها. هذا بالإضافة إلى التلوث البكتيري والميكروبي للبيئة المائية الناجم عن عمليات الصرف المباشر لمياه محطات الصرف الصحي غير المعالجة أو نصف المعالجة وكذلك مخلفات المنازل وحظائر الطيور والحيوانات الداجنة.

ولم يقتصر الأمر على دولنا النامية فقط، أو التي تحت مستوى النمو، التي مزقتها الحروب، بل امتد نطاق تلوث البيئة المائية إلى الدول المتقدمة على حد سواء. فقد ذكرت الهيئة الأمريكية لحماية البيئة أخيرا أن شُرب المياه الملوثة يؤدي إلى إصابة أكثر من نصف مليون شخص سنويا بأمراض ومشاكل صحية مختلفة، وذلك في الولايات المتحدة الأمريكية وحدها. هذا في الوقت الذي تتوقع فيه كل التقارير والدراسات البيئية على مستوى الهيئات والمنظمات الدولية، أنه بحلول العام 2015 سوف يعيش أكثر من ثلاثة مليارات من البشر في ضيق شديد ناتج عن عدم توافر مياه كافية لتغطية احتياجاتهم الأساسية. وفي الوقت الذي سوف يعجز فيه أكثر من مليار شخص عن الحصول على كوب من الماء النظيف، سوف يحصل مليارا شخص على مياه ملوثة، مما يؤدي إلى إصابتهم بأمراض ومشاكل صحية خطيرة.

وفي إطار ما تقدم، فقد أصبحت البشــرية في حاجة ماسة وملحة إلـــى إيجاد طرق مبتكرة ومواد فعالة، ليتم توظيفها في معالجة وتنقية المياه. وقد أظهــرت النتائج البحثية والميدانية التي نُفذت على مصادر متنوعة للمياه، باستخدام المواد النانوية والأجهزة المبنية على تكنولوجيا النانــو، تحســنا واضحــا وكبيرا في مســتوى ملاءمة الميــاه المُعالجة للاستخدام الآدمي.

● تنقية المياه الجوفية

تعد مشــكلة تلوث مياه الآبــار الجوفية بمركبات المــواد العضوية الســامة، وعناصر الفلزات الثقيلة المُسـرطنة، التــي يأتي على رأس قائمتها عنصر الزرنيخ ومركباته، أبرز المشاكل والتحديات البيئية التي يواجهها العالم اليوم. وكما يؤكد الشــكل (11 - 1)، فإن مشكلة تلوث الميــاه الجوفية لا تخص فقط بلدان العالــم الأقل نموا مثل بنغلادش ونيبال وحدهما، ولكنها تعد مشكلة عالمية تضرب البلدان المتحولة مثل الصين والهند، والنامية مثل الأرجنتين والبرازيل. كما يمتد كذلك أثر هذه المشكلة ليشمل عددا كبيرا من بلدان العالم الصناعي المتقدم مثل بعض دول أوروبا وأســتراليا. وتتجســد هذه المشكلة بشكل مفزع في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث يعتمد نحو 50 في المائة من السكان علــى طبقات المياه الجوفية الطبيعية لتوفيــر احتياجاتهم اليومية من الميــاه العذبة. وكما هو مبين بالشــكل (11 - 1) فــإن المياه الجوفية الموجــودة في عدة مناطق بالولايات الواقعة قرب الســاحل الأمريكي الغربي يرتفــع تركيز عنصر الخارصين فيها عن مســتوى 200 ألف ميكروغرام في اللتر الواحد ! ومن المؤســف ذكــره، أن محاولة تنقية هذه المياه باســتخدام الطرق التقليدية لفصل عناصر الفلزات الثقيلة أو المركبات العضوية السامة عنها، تعد عملية مُعَقدة باهظة التكاليف، حيــث يحتاج تنفيذها إلى عــدة مئات المليارات مــن الدولارات، هذا عــلاوة على طول الفترة الزمنية التي تحتاج إليها، والتي قد تمتد إلى سنوات وعقود عديدة.



الشكل (11 - 1): خريطة العالم السياسية موزعة عليها نسب وجود عنصر الخارصين السام في المياه الجوفية للدول، مُقدرة بوحدة الميكروغرام في اللتر الواحد [2].

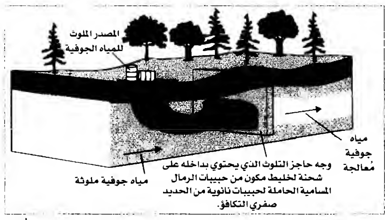
وخلال العقدين الأخيرين ومع زيادة الاهتمام بالمواد النانوية والتعرف على خواصها واستخداماتها المستقبلية، أظهرت حبيبات بعض العناصر الفلزيــة وبعض عناصر أشــباه الفلزات ذات التكافــؤ الصفري Zero-valence Metals، وعلى الأخص فلز الحديد صفري التكافؤ Fe^0 قدرة كبيــرة على معالجة المياه الملوثة، وذلك عند تدني مقاييس أقطارها إلى أقل من عشرة نانومترات. ويتيح تصغير الحبيبات لذرات الحديد القابعة داخــل الحبيبة أن توجد بصورة مكثفة على ســطح الحبيبة، مما يعظم من نشــاطها. وتقوم حبيبات الحديد النانويــة بمهام تخليص المياه من مركبات الهالوجينات السامة لمركبات الكلور، مثل رباعي كلوريد الكربون CCl_4، وذلك عن طريق تكسير جزيئات المركب ونزع عنصر الكلور منه، وتحويل المركب إلى مركبات عضوية بسيطة غير ضارة بالبيئة. كما تقوم حبيبات الحديد النانوية بانتزاع عنصر الأكســيجين من جميع أكاسيد النيتروجين NO_x الســامة الموجودة بالمياه الملوثة وتحريرها من عنصر النيتروجين الذي ينطلق في صورة نيتروجين جوي يماثل نظيره الموجود بالهواء الجوي تماما.

ولا يقتصـــر دور حبيبات الحديد النانوية على ماســبق فقط، بل يمتد دورهـــا الحيوي إلى تنقيـــة المياه الملوثة من عناصر الفلـــزات الثقيلة، مثل الزرنيخ As، وأكسدته وتحويله إلى صورة كميائية غير ضارة [3].

• **حبيبات الحديد صفري التكافؤ لتنقية المياه الجوفية**

كما ذكرنا ســـلفا، فلقد أظهـــرت نتائج التجارب المعمليـــة قدرة فائقة للحبيبـــات النانويـــة لعنصر الحديـــد صفري التكافؤ فـــي القيام بمهامها الخاصة بتنقية المياه الجوفية الملوثة بالمخلفات الصناعية. وقد عزا العلماء تلـــك القدرة الفريدة إلى صغر أحجام حبيبات الحديد المســـتخدمة الذي يعني تمتعها بمساحة سطحية كبيرة ووجود أعداد كبيرة من ذرات الحديد على الأســـطح الخارجية لتلـــك الحبيبات، مما يعزز ويزيد من نشـــاطها الكيميائي وقدرتها على أداء دور المحفزات الكيميائية النشـــطة، وذلك إذا ما تم ضخها إلى مكامن المياه الجوفية الملوثة بالمركبات العضوية شـــديدة الســـمية. وتَجدر الإشـــارة هنا إلى أن صفة الحجـــم المتناهي في الصغر لحبيبات الحديد المســـتخدمة قد أتـــاح لها القدرة على التخلل بســـهولة من خلال المســـام الدقيقة لطبقـــات التربة التي تعلو المياه الجوفية وكذلك الحاملة لها، وهذا بطبيعة الحال يؤهلها للتعامل بكفاءة مع الملوثات الكامنة في بؤر المسام الميكرومترية والنانوية بالتربة وإزالتها.

وتتلخـــص عملية تنقيـــة المياه الجوفية من الملوثـــات العضوية في ضخ خليـــط مكون من مســـحوق حبيبـــات الحديد نانوية الأقطـــار يتم خلطها بحبيبات مســـامية من الرمال، لتقوم بدور الوســـط الحامل لها وضخ هذا المخلوط في بئر رأســـية تصل إلى طبقة صخر القاع Bed Rock الموجودة تحت الســـطح السفلي لطبقة المياه الجوفية المراد معالجتها. ويشترط في هـــذه البئر المشـــحونة بالحبيبات أن تُنفَّذ على هيئة متوازي مســـتطيلات بحيث تعترض أحد أوجهها الممتدة على عرض طبقة المياه الجوفية مســـار سريان تلك الطبقة المائية، كما هو مبين في الشكل (11 - 2). ويطلق على هذه البئر العمودية المشحونة بالحبيبات مصطلح «حاجز التلوث أو حاجب التلوث Contamination Barrier».



الشكل (11 - 2): رسم تخطيطي موضحا عليه كيفية معالجة المياه الجوفية المُلوثة مـن خـلال مرورها عبـر جدار لحاجـز مشـحون بخليط من حبيبـات الحديـد النانوية المحمولة بواسطة رمال مسامية (4).

وبمجــرد دخــول المياه الجوفية الملوثــة إلى واجهة البئــر المتعامدة على مســارها وتخللها للمســام الرملية الحاضنة لحبيبات الحديد النانوية على طول سمك البئر، تبدأ مركبات الملوثات في الالتقاء مع حبيبات الحديد التي تقوم بدورها في تكســير روابط تلك الجزيئــات وتحويلها إلى صور عضوية غير ضارة. فعلى ســبيل المثال ينتج عن عملية تنقية المياه من جزيئات رباعي كلوريد الكربون CCl_4 شــديد الخطورة غاز الكلور Cl والكلوروفورم $CHCl_3$ الأقل خطورة. هذا وتعتمد ميكانيكية التفاعل الســابقة على تفاعل الأكسدة - الاختــزال، حيث تتأين حبيبات الحديــد متحولة إلى أيونات موجبة ثنائية الشحنة، ينطلق معها عدد 2 إلكترون e. وتبدأ الإلكترونات السالبة في وجود أيون الهيدروجين بالتفاعل مع رباعي كلوريد الكربون على النحو التالي:

$$Fe^0 \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

$$CCl_4 + 2e^- + H^+ \rightarrow CHCl_3 + Cl^-$$

وكما هو مبين بالشــكل (11 - 2)، تخــرج المياه، بعد أن باتت مياها مُعالجة خالية من المركبات العضوية السامة والمسرطنة، من الوجه المقابل للبئــر من الناحيــة الأخرى، وذلك تحت تأثير الميــل الطبيعي المتحكم في اتجاه سريان طبقة المياه الجوفية.

وقد أظهرت نتائج التجارب الحقلية لفريق بحثي بجامعة «لاهاي الأمريكية» على فاعلية توظيف حبيبات الحديد وسبائكه النانوية في عمليات تنقية المياه الجوفية وتخليصها من المركبات العضوية الفتاكة شديدة السمية مثل ثنائي الفينيل متعدد الكلور والمبيدات الحشرية مثل «دي دي تي». كذلك تمثل حبيبات الحديد صفري التكافؤ محفزات واعدة تستخدم لإزالة مركبات الزرنيخ As من المياه الجوفية الملوثة والتي تقع بالقرب من المناطق الصناعية.

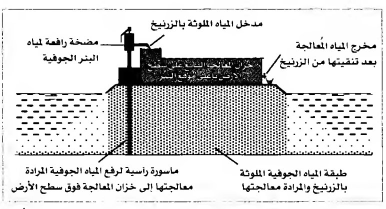
ومن المعروف أن الزرنيخ يوجد في المياه الجوفية على صورتين، هما أيونات AsO_3^{3-} (زرنيخيات ثلاثية) وAsO_4^{3-} (زرنيخيات خماسية) وذلك وفقا لمدى حامضية أو قلوية الوسط المائي المحيط [5]. وكلتا الصورتين من الزرنيخ تتسم بالسمية، بيد أن الزرنيخيات الثلاثية هي الأخطر حيث تفوق سميتها سمية الزرنيخيات الخماسية بنحو عشرة أضعاف، لذا فإن ميكانيكية عمل حبيبات الحديد النانوية تقوم على كيفية أكسدة الزرنيخيات الثلاثية عالية الذوبان في الماء لتكوين مركب الزرنيخيات الخماسية ضعيفة الذوبان والذي يمكن إزالتها من الماء بسهولة بعد أن تترسب به. ويتم التفاعل في إطار التفاعلات التالية [6]:

$$Fe^0 + O_3 + 2H^+ \longrightarrow Fe^{2+} + H_2O_2$$
$$Fe^{2+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{III}OH^{2+} + OH^\bullet$$
$$OH^\bullet + H_3AsO_3 \longrightarrow H_2AsO^-_4 + H_2O + H^+$$

وعلى النقيض من الأسلوب المتبع في تكسير مركبات الهالوجينات السامة، فإن الطريقة المُتبعة في معالجة المياه الجوفية لإزالة الخارصينات الثلاثية منها يتم من خلال ضخ المياه الجوفية مرحليا إلى خزان ينشأ أعلى البئر، كما هو موضح في الشكل (11 - 3). والخزان المبين في الشكل ينقسم في الداخل إلى عدة غرف بحيث تمر عليها المياه الجوفية الواردة من البئر، وتختص كل غرفة بتنفيذ مهام مختلفة عن الغرفة التي تليها، فنجد أن الغرفة الأولى تختص بالتنقية الأولية للمياه، وذلك من خلال عمليات ترشيح ومعالجات كيميائية تتم بغرض التخلص من شوائب الأجسام الصلبة والجسيمات البكتيرية.

وتُنهي المياه المُرشحة مسارها بالمرور على أهم مرحلة، وهي مرحلة أكسدة الزرنيخيات الثلاثية وتحويلها إلى معلقات ورواسب من أملاح الزرنيخيات الخماسية، وذلك عن طريق إمرار المياه إلى طبقة مكونة من خليط من الرمال الناعمة المحتوية مسامها على حبيبات الحديد صفري التكافؤ والذي بواسطته يجري التخلص من الخارصينات السامة. وتتبع تلك المرحلة مرحلة الترشيح النهائي وخروج مياه نظيفة تماما. ويرجع السبب وراء استخدام طريقة تنقية المياه داخل خزانات تنشأ خارج البئر إلى أن كيمياء الخارصينات ذاتها تعد كيمياء مُعقدة للغاية، وتتوقف التفاعلات بها على مجموعة من العوامل المختلفة المساعدة والتي يصعب التحكم فيها عند وجود المياه تحت سطح الأرض.

ويُعتبر العامل الهيدروجيني (pH) أحد أهم تلك العوامل المساعدة التي يجب البحث في تأثيرها على تفاعل الأكسدة - الاختزال، واختيار القيم المناسبة وفقا لمياه كل بئر. والتحكم في هذه العوامل المساعدة يعمل على ضمان نجاح أكسدة أيونات الزرنيخيات الثلاثية المذابة في الماء وتحويلها إلى مركبات غير مذابة من أيونات الزرنيخيات الخماسية سالبة الشحنات التي تنجذب كي تلتصق بأسطح جزيئات أيدروكسيد الحديد $Fe(OH)_3$ الموجبة، ومن ثم تتم إزالتها بواسطة تقنيات الفصل المغناطيسي باستخدام مجال مغناطيسي ضعيف.



الشكل (11 - 3): رسم تخطيطي يوضح طريقة معالجة المياه الجوفية المُلوثة بالزرنيخ من خلال استخدام ضخ المياه إلى خزان يقع خارج سطح الأرض، والذي فيه تحدث المعالجة بواسطة حبيبات الحديد النانوية صفرية التكافؤ.

• حبيبات الذهب النانوية المغلفة بقشور البلاديوم لتنقية المياه

أدى الاجتهاد والتفاني في إجراء الأبحاث العلمية المتعلقة بتطبيقات تكنولوجيا النانو في المجال البيئي بصفة عامة، وفي مجال تنقية المياه الملوثة على وجه الخصوص، إلى التوصل لطرق فريدة سوف توظّف في عمليات تخليص المياه الجوفية الملوثة مما تحتويه من مركبات عضوية سامة ومسرطنة، يتصدر قائمتها مركب ثلاثي كلوريد الإيثين TCE. ومن المعروف أن هذا المركب الذي يستخدم في أغراض إذابة الشحوم والزيوت يتسرب إلى المياه الجوفية عن طريق الخلل الكائن في عمليات الصرف الصناعي في المصانع المُستخدمة لهذا المذيب العضوي في عمليات تنظيف أسطح الفلزات وإذابة عوالق الشحوم والزيوت منها. كما يُستخدم في تحضير مستحضرات تنظيف الثياب والأقمشة لتخليصها من البُقع الدهنية العالقة بها.

وفي إطار التعاون البحثي القائم بين «جامعة رايس الأمريكية» ومعهد «جورجيا التكنولوجي» بواشنطن تم التوصل إلى طريقة فريدة لتنقية مياه الآبار من جزيئات مركب TCE السام، وذلك باستخدام حبيبات نانوية من الذهب مغطاة بطبقة رقيقة السمك من عنصر البلاديوم Pd. وقد أظهرت النتائج أنه مع استخدام متراكبة حبيبات البلاديوم - الذهب النانوية تزداد قدرة البلاديوم في تكسير جزيئات مركب TCE وتحويله إلى غاز الإيثان - وهو من الغازات الهيدروكربونية غير السمية عديمة اللون والرائحة - وذلك بنحو 100 ضعف قدرته منفردا. وتواصل جهود علماء تكنولوجيا النانو تقدمها في تصنيع محفزات نانوية تتألف من متراكبات حبيبات الفلزات النبيلة لتوظيفها في مجال تنقية مياه الشرب وإزالة جزيئات المركبات السامة والمسرطنة الذائبة بها (7-9).

• مرشحات المياه المعتمدة على تكنولوجيا النانو

دخلت تكنولوجيا النانو، بكثافة، في إنتاج عدد من مرشحات المياه التي تستخدم في تنقية مياه الشرب الملوثة. وتقوم الأغشية Membranes والمُرشحات Filters بجميع أشكالها ومقاييسها، بتأدية مهام متعددة ترمي

في النهاية إلى الحصول على ماء عالي الجودة، حيث تقوم بتصفية المياه من البكتيريا والفيروسات والعناصر الفلزية الثقيلة، وكذلك تقوم بتخليص مياه الشرب من المركبات العضوية العالقة بها، وتعد طريقة ترشيح المياه المعروفة باسم الترشيح الفائق Ultrafiltration من أشهر طرق الترشيح الميكانيكي للمياه وأكثرها فاعلية حيث تقوم بفصل العوالق التي تتراوح مقاييسها بين 2.5 نانومتر إلى 10 نانومترات. وتتألف مُرشحات المياه المستخدمة في هذه الطريقة من طبقات مترابطة متصلة حلزونية الشكل مصنوعة من صفائح الألياف الزجاجية مكونة من فجوات ومسام نانوية الأقطار. وتبدأ عملية الترشيح والتنقية عند تطبيق تعريض المياه إلى تيار من الهواء المضغوط مما يجبرها بما تحتويه من مركبات عالقة خفيفة الوزن على الاندفاع إلى مسام أغشية أحد أوجه المرشح التي تسمح فقط بمرور جزيئات الماء H_2O Molecules فقط دون غيرها، وذلك رجوعا إلى تدني جزيئات الماء عن أبعاد أقطار الفتحات المسامية لأغشية المرشِح، ومن ثم تُحجَز جسيمات الفيروسات والبكتيريا الميكرومترية وجميع جزيئات المواد العالقة بالماء والتي تزيد أبعاد أقطارها عن مقاييس أقطار فتحات غشاء المُرشِح.

هذا وقد طور فريق من العمل تابع لمركز تكنولوجيا النانو للعلوم البيئية والبيولوجية التابع لجامعة رايس الأمريكية مُرشحات الأغشية وذلك عن طريق تصنيع أغشية مُرشِحات مصنوعة من مواد سيراميكية من أكسيد الحديد Iron Oxide Ceramic Membrane نانوية الحبيبات. وتُعرف هذه الأغشية باسم الأغشية التفاعلية Reactive Membranes وذلك رجوعا إلى دور ما توفره من قدرة فائقة في إزالة وتحليل الملوثات والنفايات العضوية من المياه وتطهيرها.

• تكنولوجيا النانو لتحلية مياه البحار والمحيطات

تعد مياه البحار والمحيطات من أهم مصادر المياه العذبة للإنسان وأنشطته المختلفة، وذلك إذا ما عولجت لتخليصها من الأملاح الذائبة بها عن طريق سلسلة من عمليات صناعية تعرف باسم

تحليـــة المياه Desalination. وفي عمليـــات تحلية المياه ومعالجتها تطبق تقنيـــة التناضح العكســـي Reverse Osmosis والذي تطبق فيـــه ضغوط عالية لإرغام الماء المذابة به الأملاح على العبور خلال أغشـــية Membrane تقوم بالاحتفاظ بالأمـــلاح الذائبة في الماء، بينما تسمح للماء النقي بعد انتزاع الأملاح منه بالعبور من خلالها. ومن المعروف أن تقنية تحلية المياه بواســـطة التناضح العكسي تعد مـــن التقنيات عالية التكلفة، حيث يتطلب تشـــغيلها كميات ضخمة من المياه ومن الطاقة.

وقـــد أعطت تكنولوجيا النانو الأمل فـــي تطوير تقنيات تحلية المياه حين تم تجريب أنابيب الكربون النانوية في صناعة الأغشية المستخدمة فـــي التحلية. وقد أكدت التجارب المعملية والميدانية أنه مع اســـتخدام أنابيب الكربـــون النانوية فإن تكلفة عمليات التحلية انخفضت بنســـبة 75 فـــي المائـــة، وذلك إذا ما قورنـــت بتقنية التناضح العكســـي باهظة التكلفة والمســـتخدمة اليوم. وتمثل أنابيب الكربـــون المؤلفة من فتحات نانوية الأبعاد مصادر فريدة ومتميزة لعمليات الترشـــيح والفلترة، حيث تُصمم فتحاتها بحيث تســـمح لجزيئـــات الماء النقي من العبور بخلالها، بينما تحجب مرور جزيئات الأملاح المذابة مع الماء النقي، لذا فهي تقوم بمهام المناخل أو المُرشحات الجزيئية Molecular Sieves.

وتزداد فاعلية عملية ترشـــيح وفلترة المياه مع اســـتخدام حبيبات أول أكســـيد الماغنسيوم النانوية MgO، وكذلك حبيبات نانوية لفلز الماغنسيوم Mg الحـــر. وتبدي هذه المواد فاعلية شـــديدة في القضـــاء على البكتيريا موجبة وســـالبة الغـــرام Gram-positive and Gram-negative، وكذلك إبـــادة الجراثيـــم البكتيريـــة Bacterial Spores (10) التي قد توجد بمياه الشرب. وتحضَّر البلورات النانوية أو مايعرف باسم نقاط الكم Quantum Dots للماغنســـيا والماغنسيوم على هيئة مســـاحيق فائقة النعومة تتألف مـــن كُريات متناهية في الصغر تقـــل أبعاد أقطارها عن 20 نانومترا، مما يُكســـبها مساحة أســـطح عالية، وهذا يؤدي إلى زيادة كبيرة في فاعليتها، للقضاء على الجسيمات البكتيرية.

تنقية الهواء بواسطة تكنولوجيا النانو

تعد الزيادة المستمرة في نسبة الملوثات الغازية بالهواء الجوي إحدى أبرز المشـــاكل التي تعاني منها البشـــرية في عالمنا اليوم، حيث تحصد ســـنويا أرواح أكثر من ثلاثة ملايين من البشـــر. ودائما ما يربط علماء الطب والرعاية الصحية بين تلوث الهواء وارتفاع نســـب الملوثات بالجو وبين الإصابة بكثير من الأمراض وحالات الوفاة. وتأتي أمراض الربو، والحساســـية وانتفاخ الرئتـــين، والالتهاب للقصبـــات الهوائية المزمن، وكذلك ســـرطان الرئة والســـكتات القلبية على قائمة أخطر الأمراض التي تصيب البشـــر من جراء التعرض الدائم لاستنشاق الهواء المُلوث. ولا تقتصر مشـــكلة تلـــوث الهواء على دول الجنوب مـــن العالم النامي والدول الأقل نموا، بل يعاني من هذه المشكلة مواطنو الدول الصناعية العظمى، وعلى رأســـها الولايات المتحدة الأمريكية التي يعاني أكثر من 60 فـــي المائة من عدد ســـكانها من أمراض الربو والحساســـية نتيجة تعرضهم لاستنشاق الهواء المُلوث.

• حُبيبات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية لتنقية الهواء الملوث

كما ذكرنا ســـلفا، تســـتخدم مساحيق ثاني أكســـيد التيتانيوم - التيتنيا - TiO_2 ميكرومترية الحبيبات على نطاق واسع في صناعات إنتاج الأصباغ ومـــواد الطلاء والبياض وصناعة الأوراق والبلاســـتيك، حيث تُنتجَ كميات ضخمة منها على مســـتوى العالـــم. وبعيدا عن الاســـتخدامات التقليدية الســـالفة، وعلـــى الرغم مـــن أهميتهـــا وتطبيقاتها المفيـــدة، فقد وجدت مساحيق التيتنيا استخدامات أكثر إثارة، وذلك إذا ما أُنتجَت حبيبات منها لا تزيد أبعاد أقطارها على 50 نانومترا. فعلى سبيل المثال، تبدي حبيبات التيتنيا التي تقل أبعـــاد أقطارها عن 50 نانومترا قدرة فائقة على حجب الأشـــعة فوق البنفســـجية، ولكنها لا تحجب الضوء من المرور، لذا فهي لا تسبب عتامة عند اســـتخدامها في أغراض الوقاية والحماية ضد الأشعة فوق البنفســـجية الحارقة. ومن ثم فهي تســـتخدم الآن بنجاح في صناعة كريمات البشـــرة ومســـتحضرات التجميل الخاصة بالوقاية من الشمس.

كذلك تستخدم الحبيبات النانوية منها في صناعة ورنيش طلاء أسطح الأخشاب للمحافظة عليها، وكذلك في صناعة ألياف النسيج وصناعة معجون الأسنان.

وتعد التيتنيا نانوية الحبيبات من أقوى المحفزات الضوئية Photocatalyst التي تتميز بوجود أسطح مؤكسدة لها، ومن ثم فهي تكافح الوجود البكتيري وغيرها من المركبات العضوية مثل التراب والعفن الفطري والبكتريا، وذلك إذا ما عُرِّضت أسطحها لأشعة الشمس أو حتى لمصدر ضوئي مثل مصباح الفلورسنت. ورجوعا لهذه الخواص الفريدة، فإن التيتنيا تجد لنفسها استخدامات واسعة ومتميزة أهلتها لكي توظف في صناعة دهانات الأسطح بغرض حمايتها من الاتساخ والتراكم البكتيري.
وقد فتحت إحدى الشركات اليابانية المجال لحبيبات التيتنيا النانوية كي تُوظف كمحفزات ضوئية فعالة تستخدم للتخلص من أكاسيد النيتروجين السامة NO_x وإزالتها من الهواء الجوي، وذلك عن طريق تكسيرها واختزالها إلى مركبات صديقة للبيئة. هذا وتعد البلورات النانوية للتيتنيا التي تقل أقطار حبيباتها عن 10 نانومترات مواد واعدة تستخدم للتخلص من أبخرة الزئبق التي تنطلق في الهواء الجوي نتيجة حرق الفحم بمحطات توليد الطاقة الكهربية. وفي وجود أشعة الشمس فوق البنفسجية، تقوم هذه البلورات النانوية بأكسدة أبخرة الزئبق وتحويلها إلى أكسيد الزئبق (في حالته الصلبة) والذي لا يمثل خطورة على صحة الإنسان. ومن المرجح أن تلقى بلورات التيتنيا النانوية مساحة كبيرة من التطبيقات الفعلية المتعلقة بمجال تنقية الهواء وإزالة ما به من ملوثات، وهذا الترجيح قائم على ما تبديه العديد من المدارس العلمية التابعة للمعاهد البحثية والجامعات من اهتمام متزايد بهذه المادة فريدة الخواص [(14-11)].



12

الإلكترونيات النانوية

«على الرغم من مرور نصف قرن منذ أن أطلق ريتشـارد فينمان رؤيتـه الثاقبة التي مهدت لقيام ثورة تكنولوجيا النانـو. فـإن كثيـرا مـن الظواهر في عالـم النانـو مـا زالت غير معروفة تماما أو قد يصعب تفسيرها»

المؤلف

تُعد الإلكترونيات عصب الحياة الحديثة والعمود الفقـري لكل التكنولوجيات، التي تأتي علـى قائمتها تكنولوجيـا المعلومات والاتصالات. وقد أضحـت الإلكترونيات منذ منتصف القـرن الماضي وحتى يومنا هذا عنصرا مهما ومكونا رئيسيا في جميع الأجهزة الكهربية الحديثة التي نستخدمها اليـوم. ويتناول هذا الفصل الدور الحيوي لتكنولوجيا النانو في دفع وتطوير صناعة الإلكترونيات، المعروفه باسم الإلكترونيات النانويـة Nanelectronics. وقـد يتفـق القـارئ الكريم معـي في أنه مـن المفيد قبيل فتح الملـف الخاص بهذا الفصل، أن نسـتعرض تطور صناعة الترانزسـتورات بصفتها المرجع الأساسي والمكون الرئيسي لجميع الإلكترونيات.

ماهية الترانزستورات

يرجع تاريخ اختراع الترانزستور إلى العام 1948 عندما قام علماء الفيزياء جون باردين John Bardeen، و والتر براتن Walter Brattain وزميلهما ويليم شــوكلي William Shockley (الشــكل 12 - 1) الباحثــون بمعامل «بل تلفون» الشــهيرة بالولايات المتحدة الأمريكية، بإعلان اختراعهم للترانزستور. وقد نال هذا الفريق في العام 1956 جائزة نوبل في الفيزياء وذلك تقديرا لهم على اختراعهم الذي غير مسار الإنسان وفتح أمامه سُبلا جديدة، وآفاقا لا نهاية لها.

والترانزســتور الذي حل محل الصمامــات المفرغة، هو وحدة صغيرة جدا تقوم بوظيفة منظم لتدفق التيار، فهو يســمح بمرور التيار من خلاله بمقــدار غير ثابت حيث إنه يختلف مــع اختلاف قيمة التيار الداخل إليه، مما مكن الترانزســتورات من التحكم في شــدة التيار، وذلك اعتمادا على شــدة تيار كهربي آخر. ويُحاكي الترانزستور في أسلوب عمله هذا، طريقة عمل المفتاح في الدائرة الكهربية، وإن اختلفت الدقة بين المكونين. وتدخل الترانزســتورات كمكونات رئيســية في بناء الدوائر المتكاملة في الأجهزة الإلكترونية المختلفة (الحاسب الآلي، المذياع، المركبات الفضائية... إلخ).

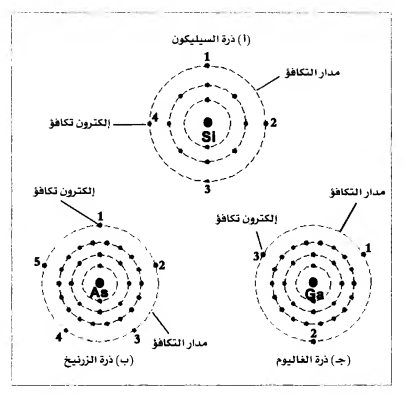


الشكل (12 - 1) : صورة فوتوغرافية تجمع بين علماء الفيزياء الثلاثة : شوكلي (الجالس)، باردين (الواقف على اليمين)، وبراتين (الواقف على اليسار) مخترعي الترانزستور والحاصلين على جائزة نوبل في الفيزياء العام 1956.

أشباه الموصلات

يمكننا تصنيف المواد وفقا لقدرتها على توصيل التيار الكهربي إلى موصـــلات مثل فلزات النحاس، الألومنيوم ومواد عازلة مثل المطاط أو الخشب. وقد بُني هذا التصنيف بناء على مدى وجود الإلكترونات الحرة وكثافتهــا الحجمية بالمدار الخارجي للذرة والمعروف باســـم مـــدار التكافؤ. لذا، فـــإن المواد الفلزية (جيـــدة التوصيل الكهربي) ترتفع فيها كثافــة وجود الإلكترونات الحرة المســؤولة عن توصيل الشحنات، هذا بينما تنخفض الكثافة الحجمية للإلكترونات الحرة فـــي المواد العازلة غير الفلزية (رديئة أو عديمة التوصيل الكهربي). بيد أن هناك مجموعة من المواد يُطلق عليها اســـم أشباه الموصلات (المواد شبه الموصلة Semiconductors، مثل السيليكون والجرمانيوم - المواد الأساســـية فـــي صناعة الترانزســـتورات - لا تخضع لهذا التصنيـــف وذلك لكونهـــا مواد فريدة، حيث يتـــراوح مقدار الكثافة الحجمية في إلكتروناتها الحرة ما بين المواد الموصلة والمواد العازلة. فعلى ســـبيل المثال، تبلغ الموصلية الكهربية لعنصر الجرمانيوم نحو تريليـــون (ألف مليـــار أو مليون مليون) ضعـــف قيمتها في الزجاج، غير أنها تقل عن نظيرتها لفلز النحاس بنحو 30 مليون مرة. وعلى الرغم من أنه عند درجة حرارة الغرفة العادية تســـلك مواد أشـــباه الموصلات سلوك المواد الموصلة، فإن هذه الصفة تتلاشى نهائيا عند درجات الحرارة المنخفضة.

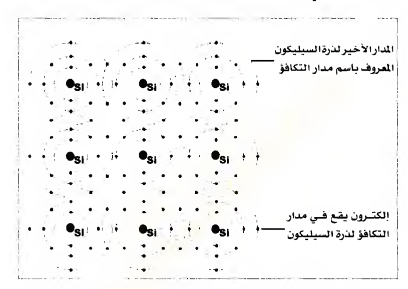
وبأخـــذ عنصر الســـيليكون - المادة الأكثر شـــيوعا وقلب صناعة الترانزستورات - كمثال، فإن ذرته الواحدة تحمل في مدارها الخارجي أربعة إلكترونات، والتي يُطلق عليهم اسم إلكترونات التكافؤ، كما هو مبـــين في الشـــكل (12 - 2«أ»). ولتكوين بلورة الســـيليكون، ترتبط كل ذرة من ذرات الســـيليكون مع ذرة مجاورة لها من العنصر نفســـه، وذلك عن طريق الرابطة التســـاهمية. ومن ثم، تصبح الذرة الواحدة من الســـيليكون وكأنها محاطة بثمانيـــة إلكترونات، كما هو مبين في الشكل (12 - 3).



الشكل (12 - 2) : رسم تخطيطي يبين نمط التشكيل الإلكتروني لذرات من عناصر مختارة لمواد أشباه الموصلات من (أ) السيليكون Si، (ب) الزرنيخ As، و(جـ) الغاليوم Ga
المصدر : تم تنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).

وعنــد درجة حرارة الصفر المطلق، فإن أشــباه الموصلات في صورتها النقية تكتســي ســمة العزل الكهربي نظرا إلى كون مدارها الأخير مشبعا بالحــد الأقصى من الإلكترونات (ثمانية إلكترونات). ويتأتى اكتمال المدار الخارجــي لذرة الســيليكون بالإلكترونات الثمانية نتيجة مســاهمة ذرات الســيليكون المجاورة لها بإلكتروناتها الخارجية لإكمال المدارات الخارجية بعضهــا لــذرات البعض، كما هــو موضح في الشــكل (12 - 3). ويؤدي اكتمــال المدار الخارجي لذرة الســيليكون إلى غيــاب الإلكترونات الحرة ســالبة الشــحنات، الأمر الذي يؤدي إلى استقرار الذرة وخمولها. غير أن

هذا الاســتقرار سرعان ما يتلاشــى عندما تتعرض مادة السيليكون، إلى درجات حرارة عالية أو تســليط مصدر إشــعاع ضوئــي عليها، فإن هذا يترجم إلى طاقة حرارية تؤثر في الروابط التساهمية بين ذرات السيليكون، مما يتســبب في تكسيرها وفكها، ويؤدي هذا بالتالي إلى زعزعة استقرار الذرات، وينجم عن هذه العملية تحرير بعض إلكترونات المدارات الخارجية للذرات تاركة في محلها ما يعرف باسم الفجوات أو الثقوب Holes.



الشكل (12 - 3) : رسم تخطيطي بين ارتباط ذرات السيليكون بعضها بالبعض عن طريق الرابطة التساهمية لتكوين بلورة سيليكون (المصدر: تم تنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).

وتحمل الإلكترونات شحناتها السالبة عند مغادرتها للمدارات الخارجية مــن الذرة، لذلك فإن الفجوات التي تتركها بتلك المدارات الخارجية تحمل شحنات موجبة. وينشــأ عن هذا التحرر تولّد كثافة في عدد الإلكترونات ذات الشحنات السالبة، تقابلها كثافة في عدد الفجوات الحاملة لشحنات موجبــة. وتتمتع الإلكترونات المُحررة بحرية كبيرة في الحركة، الأمر الذي يــؤدي إلى أن تحتل فجوات موجبة الشــحنات تقع بمدارات أخرى لذرات مجاورة داخل بلورة السيليكون الواحدة.

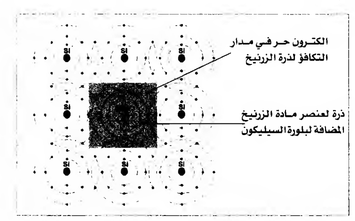
ومـــع اســـتمرار التعرض لدرجـــات الحـــرارة العالية، فـــإن هذه الإلكترونات ســـرعان ما تتـــرك مواقعها في الفجـــوات التي احتلتها لتحتـــل وتملأ فجوات أخرى جديدة، مخلفـــة وراءها فجوات جديدة، تقوم مجموعة أخرى من الإلكترونـــات باحتلالها. وبذلك تكون بلورة مادة شـــبه الموصل قد انتقلت إلى حالة من عدم الاستقرار تتمثل في حركة دائبة ودائمة لإلكترونات مداراتها الخارجية، مما يعني توصيل التيار الكهربي.

وفـــي البلورات النقية لعناصر أشـــباه الموصلات، فـــإن الإلكترون المتحرر من المدار الخارج ينطلق تاركا محله فجوة تحمل شحنة موجبة (عدد الإلكترونات المُحررة ســـالبة الشـــحنة يســـاوي عـــدد الفجوات موجبة الشـــحنة) كي ينجـــذب إليها نفس الإلكتـــرون المحرر أو غيره من الإلكترونـــات الأخرى. وبمجرد عودة الإلكتـــرون واحتلاله موقعه الأصلي، فإن المادة تفقد خاصية التوصيل نظرا إلى غياب الإلكترونات الحُرة المسؤولة عن التوصيل الكهربي. ومن هنا بدأ التفكير في كيفية خلق عدد أكبر من الإلكترونات الحرة بحيث تكون الذرة دائما في حالة من عدم الاســـتقرار. ومن هنا جاءت فكرة إضافة شـــوائب Dopants إلـــى عناصر أخرى من أشـــباه الموصلات لتكوين بلورات ســـالبة (بها فائض مـــن الإلكترونات الحرة) وبلورات موجبـــة (بها فجوات موجبة الشحنة تجذب الإلكترونات الحرة ســـالبة الشحنة إليها) مما يضمن استمرار تمتع خاصية التوصيل الكهربي لمادة الأساس (السيليكون في هذه الحالة).

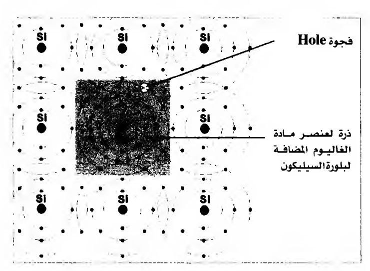
وتتكون بلورة ســـالبة من الســـيليكون عن طريق إضافة شـــوائب لعناصـــر مواد من أشـــباه الموصلات مثل الفوســـفور P والزرنيخ As والأنتيمون Sb إلى الســـيليكون. وتسبب هذه الشوائب عند إضافتها وفرة فـــي عدد الإلكترونات الحرة ســـالبة الشـــحنة، ومـــن ثم فهي تُسمى بالشوائب السالبة Negative-type doping ويرمز لها بالرمز N-type ويرجـــع الســـبب وراء اختيار تلك العناصـــر، إلى كونها مواد من أشـــباه الموصلات ذات تكافؤ أعلى من تكافؤ السيليكون (الرباعي

التكافؤ)، مما يعني أن المدارات الأخيرة لذراتها تحمل عدد خمسة من إلكترونات التكافؤ. وعند إضافة الزرنيخ إلى السيليكون، فإن أربعة إلكترونات فقط من الإلكترونات الخمسة بالمدار الأخير لذرة الزرنيخ (الشكل 12 - 2«ب») تشترك مع إلكترونات السيليكون الأربعة ليكوّنا معا رابطة تساهمية، بينما يتبقى إلكترون واحد حر من الزرنيخ يحمل شحنة سالبة لا يشارك في هذه الرابطة، كما هو موضح في الشكل (12 - 4). ورجوعا إلى الدور الذي تقوم به ذرات هذه العناصر في تكوين بلورة السيليكون السالبة، فإنها تسمى بالمانحات أو المعطيات Donors، وذلك نظرا إلى دورها المتمثل في منح الإلكترونات. ويتم التوصيل الكهربي في هذا النوع من الترانزستورات المصنوعة من البلورات السالبة ، من خلال ذلك الفائض من الإلكترونات الحاملة للشحنات السالبة.

ولتكوين بلورة موجبة Positive-type doping (P-type) تضاف شوائب عنصر من عناصر أشباه الموصلات ثلاثية التكافؤ مثل الإنديوم In، الغاليوم Ga، أو البورون B. وتحتوي ذرة الغاليوم في مدارها الأخير على ثلاثة إلكترونات (الشكل 12 - 2 «جـ») تشارك بهم جميعا في إنشاء رابطة تساهمية مع الإلكترونات الأربعة الموجودة بمدار التكافؤ لذرة السيليكون، كما هو في الشكل (12 - 5). وعلى النقيض من تكوين البلورة السالبة، تفتقر ذرة الغاليوم إلى وجود إلكترون واحد لتتم به الرابطة التساهمية مع ذرة السيليكون. وينشأ عن غياب هذا الإلكترون، تكون فراغ بالمدار الأخير لذرة الغاليوم يُعرف بالفجوة Hole التي تحمل شحنة موجبة. وهذه الفجوة تحتاج إلى إلكترون حر ذي شحنة سالبة كي ينجذب ليملأها. ومع تزايد عدد الفجوات الموجبة بالبلورة تزداد قدرتها على توصيل التيار وتُعرف في هذه الحالة بالبلورة الموجبة، وتعرف عناصر أشباه الموصلات المتسببة في خلق هذه الفجوات التي تجذب إليها الإلكترونات الحرة لتحتلها باسم المُتقبلات Acceptors.



الشكل (12 - 4): رسم تخطيطي يبين بلورة السيليكون بعد إدخال عنصر الزرنيخ As بها. والشكل يوضح وجود إلكترون حر سالب الشحنة لذرة الخارصين غير مشارك في الرابطة التساهمية القائمة بين ذرات عنصري السيليكون والزرنيخ (المصدر : تم تنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).



الشكل (12 - 5) : رسم تخطيطي يبين بلورة السيليكون بعد إدخال عنصر الغاليوم Ga بها. والشكل يوضح غياب عدد إلكترون واحد بمدارها الأخير، مما يسبب تكون فجوة موجبة الشحنة تنشأ في هذا المدار. (المصدر : تم تنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).

تركيب الترانزستور وكيفية عمله

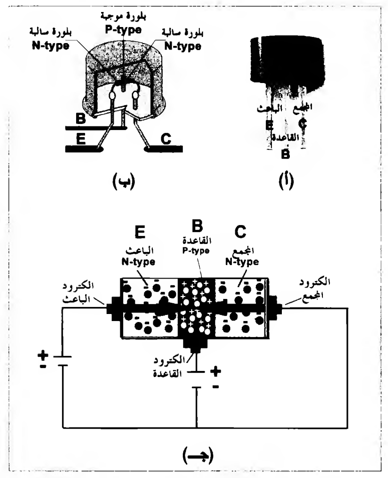
تُعد البلورات ذات الشحنات المختلفة (السالبة والموجبة) المكونات الرئيسية التي يتألف منها الترانزستور، حيث تُوضع متلاصقة لتكوّن في ذلك ما يعرف باسم الترانزستور الاتصالي Junction Transistor. ويوضح الشكل (12 - 6) رسما تخطيطيا لمكونات الترانزستور الاتصالي والذي يحتوي على ثلاثة أطراف هي:

- الباعث Emitter ويرمز له بالرمز E، وهو بلورة متوسطة الحجم من مادة لأشباه الموصلات سالبة الشحنة (N-type) حيث تعتبر مصدر انبعاثات الإلكترونات.
- القاعدة Base ويرمز لها بالرمز B، وهو بلورة لمادة من أشباه الموصلات صغيرة الحجم موجبة الشحنة (P-type) تُوضع بين الباعث والمُجمع بحيث تسمح للإلكترونات المنبعثة بالمرور من خلالها.
- المُجمع Collector ويرمز له بالرمز C، ويمثل الطرف الثالث الأخير من الترانزستور الاتصالي وهو عبارة عن بلورة لمادة من أشباه الموصلات كبيرة الحجم سالبة الشحنة (N-type) تُجمِّع الإلكترونات المنبعثة من طرف الترانزستور الأول (الباعث).

وعلى النقيض من ترتيب البلورات السالبة والموجبة المُؤلفة لأطراف النوع السابق من الترانزستورات المعروفة باسم NPN، فإن ترتيب أطراف النوع الآخر من الترانزستورات المعروف باسم PNP تتألف أطرافه وفقا للترتيب التالي: P-type ،N-type ،P-type.

ويبين الشكل (12 - 6 «جـ») كيفية وضع الوصلات بين مكونات الترانزستور من النوع NPN بحيث تتكون من زوج من الوصلات موضوعتين ظهرا لظهر، الأولى بين الباعث والقاعدة، والثانية وصلة بين القاعدة والمجمع. ورجوعا إلى هذا النمط من الوصلات، يسمى الترانزستور في هذه الحالة بالترانزستور ثنائي قطب الالتقاء Bipolar Junction (BJT) Transistor. وكما هو مبين بالشكل، ففي هذا النوع من الترانزستورات، تقوم القاعدة B بعمل مفتاح تشغيل أو غلق On/Off كهربي متناهي الدقة. حيث يتسبب مرور التيار من الباعث E إلى القاعدة B في توليد مقاومة

منخفضة بين المجمع C والباعث E مما يؤدي إلى فتح طريق لمرور التيار ليكون الترانزستور في وضع التشغيل، ويؤدي غياب التيار من السريان إلى القاعدة B إلى عدم مروره من القاعدة B إلى الباعث E وبذلك يكون الترانزستور في وضع الغلق.



الشكل (12 - 6) : صورة لترانزستور اتصالي من النوع NPN (أ) مبين فيه رسم تخطيطي لمقطعه الداخلي (ب) وكيفية انتقال الإلكترونات من البلورات السالبة C وE لتحتل مواقع الفراغات الموجبة الموجودة بالقاعدة B (جـ) (المصدر: تم تنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب).

تأثير ميكانيكا الكم في خواص أشباه الموصلات

إن التلاعب في ذرات أشـــباه الموصلات (المادة الأساســية لصناعة الترانزستورات) وإعادة ترتيبها والتحكم في أبعادها لا يهدف فقط إلى الحصول على مواد متناهية الصغر، بقدر ما يهدف إلى الحصول على شــرائح إلكترونية جديدة ومتميزة تتوافر فيهــا خواص فريدة تؤهلها لصناعة أجيال جديدة من معالجات الحاسبات السريعة ذات القدرات العاليــة. فتصغيــر المادة يؤدي إلى اكتســابها صفــات جديدة لم تكن متأصلة فيها من قبل. وهذه الصفات تكتســبها المادة المُصغرة كنتيجة طبيعية لزيادة المســاحة السطحية لها بعدة ملايين من المرات، ومن ثم بروز كم هائل من ذراتها على هذه الأسطح بعد أن كانت مختبئة داخل حبيبات المادة قبل إتمام عملية التصغير. وكما أشرنا في فصول سابقة من هذا الكتاب، فإن زيادة مســاحة الأســطح تزيد من نشاط وفاعلية المــادة، فإذا أخذنا فلز الذهب المكون من حبيبات كبيرة الأحجام مثالا، فإننــا نجد أنه فلــز نبيل لا يتفاعل مع أي عوامــل تحيط به، لذا فهو خامــل. بيد أنه إذا ما صُغرت حبيبات فلز الذهب لتكون في مســتوى النانــو، فإن ذلك يعمل على تنشــيطها وفاعليتها، لذا فهيُ تســتخدم كمحفزات كيميائية قوية.

وعلى الرغــم من مرور نصف قرن منذ أن أطلق ريتشــارد فينمان رؤيتــه الثاقبة التي مهدت لقيام ثورة تكنولوجيــا النانو، فإن كثيرا من الظواهــر في عالم النانــو ما زالت غير معروفــة تماما أو قد يصعب تفســيرها. بيد أن هناك شيئا واحدا مؤكدا وثابتا، وهو أن جميع المواد النانوية لا تتبع في حركتها قوانين نيوتن الكلاســيكية. ففي حالة المواد كبيرة الأحجام، تعبر قيم الخواص المعينة لها عن متوســط القيم وليس عن خواص إحــدى حبيباتها، ومن أجل تفهـم خـواص المـواد النانويـة لا بد من تفهم خواص كل حبيبة نانونية على حدة، وهذا بالتالي يتطلب تفهما كامــلا لنظرية الكم (الكوانتــم) Quantum Theory، وهي تلك النظرية التي نشــأت بهدف تصحيح قوانين نيوتن الكلاسيكية وجعلها موائمة للتطبيق على مستوى المواد النانوية التي تقل أبعاد حبيباتها عن

100 نانومتــر. وكلمة الكم (الكوانتــم) تعبر عن مصطلح فيزيائي يعني أصغر كمية يمكن أن نحصل عليها نتيجة تقسـيم أو تجزئة شــيء ما، حيــث يعبر الكم عن مقدار كمية الطاقة المنبعثة بشــكل متقطع وليس بشــكل دائم مســتمر. وتعد نظرية الكم العمود الفقريَ للإلكترونيات والبحوث العلمية المتعلقة بأشباه الموصلات حيث لا بديل ولا غنى عنها لتفهم طبيعة وخواص أشباه الموصلات تفهما جيدا.

وفي إطار ما تقدم، يمكننــا أن نتفهم المعنى المقصود من ميكانيكا الكم (الكوانتــم) Quantum Mechanics ووصفه في عبارة مختصرة وكلمــات بســيطة على أنه ذلك الفــرع من الفيزياء الــذي يعتمد في أساســياته على نظريــة الكم (الكوانتم)، والذي يهتم بتعيين ودراســة خواص وســلوك المادة عند مســتواها الذري، النووي، الحبيبي. وعند هذه المســتويات، فإن خواص المــادة مثل الطاقة، والعــزم، والكتلة لا تتغير بمعدل ثابت كما هو مألوف في المواد ذات الأحجام أو الحبيبات الكبيــرة. وفي الحين الذي تُوظف فيه قوانين نيوتن الفيزيائية للتعبير عن حركة الأجســام الكبيرة، فإن ميكانيكا الكم لها القدرة على وصف سلوك الجزيئات والذرات وصفا نموذجيا ودقيقا على مستوى النانومتر الواحد وما دونه.

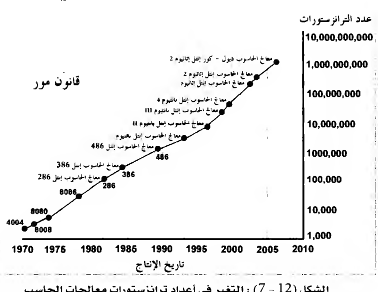
قانون مور Moore's Law

لاحــظ غوردون مــور Gordon Moore في منتصف الســتينيات وقبيل تأسيس شركته - شركة إنتل Intel الأكثر شهرة في إنتاج مكونات الكمبيوتر - ببضع سنوات، أنه في الإمكان مضاعفة عدد الترانزستورات في شريحة وحدات المعالج المركزية (CPU)، Central Processing Unit والتي عادة ما تختصر ليطلق عليها اســم المعالج Processor كل عامين وذلك من دون تكلفة تُذكر. وقد رأى في ذلك الحين أنه إذا ما اســتمر هذا التضاعف في عدد الترانزستورات بصورة دورية، فإن كثافة شرائح الســيليكون المســتخدمة في تأليف نحو 50 مكونا من مكونات الدوائر الإلكترونيــة المتكاملة ســوف ترتفع لتصل بحلول العــام 1975 إلى ما

يربــو على 65 ألف مكون في الدائرة الواحدة. ويُعرف هذا الاســتنتاج بقانون مور الذي يُســتخدم في التنبؤ بالعدد المستقبلي للترانزستورات بمعالجات أجهزة الحاســب. وقد اعتُمد على هذا القانون في حســاب عدد الترانزســتورات المحتمل توظيفه لإنتاج معالجات الحواسب الآلية خلال الفترة من 1971 – 2007، كما هو مبين في الشــكل (12 – 7). وبالنظر إلى الشكل المذكور، نســتطيع استنتاج أن عدد الترانزستورات الموظفة في إنتاج معالجات الحواســب قد تضاعف خلال الفترة المبينة بنحو 250 ألف مرة.

التنافس العالمي في إنتاج الحاسبات المعتمدة على تكنولوجيا النانو

وليس ثمة شــك، في أنه من دون التقنيــات الإنتاجية التي توفرها تكنولوجيا النانو، ما كان من الممكن الوصول إلى هذا العدد الضخم من الترانزســتورات المستخدمة في المعالج الواحد، والتي تخطت أعدادها بالمعالــج «ديول – كور إنتــل إتانيوم 2» حاجز المليار وحدة. ووجود هذا العدد الضخم من الترانزســتورات في المعالــج الواحد يعني مضاعفة قدرات الحاســب وســرعته في إجراء العمليات الحسابية المُعقدة في كســور من الثانيــة الواحدة، ومضاعفــة قدراته فــي معالجة الصور ومختلف الوسائط الســمعية والبصرية. ومع تقنيات تكنولوجيا النانو، تمكنت شــركة إنتل من مضاعفة أعداد الترانزستورات المستخدمة في المعالجــات وذلك عن طريق تصغير أبعادها، التي وصلت اليوم إلى 90 نانومترا بعد أن كانت منذ خمسة أعوام تربو على 130 نانومترا. ومن المنتظر أن تصل أبعاد الترانزســتورات إلى أقل من 50 نانومترا وذلك خلال الســنوات القليلة المقبلة. وعلى الرغم من ذلك التقدم المســتمر فــي صناعة الرقائق والمعالجــات، فإن تكنولوجيــا صناعة المعالجات الحالية ســتصل قريبا إلى نهاية حدودهــا وقدراتها المادية، مما يدفع صانعي الرقائق الإلكترونية إلــى الابتكار والاختراع لإيجاد تكنولوجيا صناعيــة بديلة تعتمد بصورة كلية علــى تقنيات تكنولوجيا النانو، مما يتيح الحصــول على أعداد أكثر من الترانزســتورات المكونة لمعالجات الحواسب الإلكترونية.



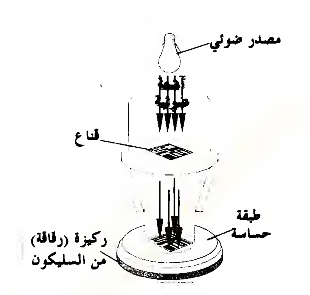
الشكل (12 - 7) : التغير في أعداد ترانزستورات معالجات الحاسب خلال الفترة من 1971 - 2007.
(الشكل من تصميم مؤلف هذا الكتاب).

تقنية الطباعة على الأسطح Lithography

سـبق أن تحدثنا عـن تقنية الطباعة على الأسـطح Lithography، حيث أوضحنا ماهيتها وذلك بوصفها من أدق وأوسـع الطرق انتشارا في مجال تصنيع الترانزسـتورات والدوائر المتكاملة. وبوساطة استخدام هذه التقنية، تُطبع الشـرائح الإلكترونية بكل أنواعها، وذلك من خلال تصميم أقنعة Masks على هيئة نماذج Patterns أو قوالب Molds تعطي تفاصيل الشـكل المرغوب تنفيـذه، والأبعاد المراد أن توجد عليها الشـرائح. لذا، تُعد هذه النماذج بمنزلة الخرائط الأساسية Blueprints التي تحدد هوية وشكل الشرائح.

ويُعرض قناع النموذج بعد تصميمه لأشـعة ضوئية قادمة من مصدر ضوئي بحيث تُسـقط هذه النماذج على ركيـزة (طبقة) Substrate من مادة السيليكون التي تُستخدم في صناعة الشرائح، ومن ثم تتكون صورة

طبــق الأصل من النموذج، كمــا هو مبين في الشــكل (12 - 8). ولعل القــارئ الكريم يلاحظ مدى التشــابه بين هذه التقنية وذلك الأســلوب المُتبع في طبع الصور والحــروف على صدور كثير من القمصان وبعض الثياب الأخرى.



الشكل (12 - 8): أسس عملية الزرع والطبع Lithography المستخدمة في إنتاج الشرائح الإلكترونية
(الشكل من تصميم مؤلف هذا الكتاب).

تقنية النانو في الطباعة على الأسطح Nano-Lithography

تتنافس الآن كثير من شــركات إنتاج الإلكترونيات العالمية في البحث والتجريب لابتكار وســائل وتقنيات متقدمة تعتمد على توظيف تكنولوجيا النانو في الطباعة الكيميائية على الأســطح فائقة الدقة، مما يعرف باسم الطباعة النانوية والتي تُستخدم فيها طريقتان هما:

- الطباعة بالقلم المغموس Dip Pen Nanolithography (DPN)
- الطباعة بالقلم المائل الحراري Thermal Dip Pen Nanolithography (tDPN)

وتعتمد طريقة الطباعة بالقلم المائل - على البارد أو الساخن - على توظيف طرف مسبار (مجس) Probe Tip ميكروسكوب القوة الذرية Atomic Force Microscope في بناء الهياكل النانوية الخاصة بالشرائح الإلكترونية حيث يُطلى المسبار بغلاف من الحبر السائل الذي يتدفق عند ملامسة طرف المسبار لسطح رقائق السيليكون مكونا الشكل المراد الحصول عليه. وتوفر هذه التقنية عالية الدقة والمعروفة باسم الكتابة المباشرة Direct-write Technique القدرة على نفث الأحبار الجزيئية Molecular Inks المحتوية على جزيئات المواد النانوية المرادة طباعتها على أسطح الركائز بالشكل المراد الحصول عليه.



13

الحساسات النانوية

غــزت الحســاســات Sensors حياتنــا المعاصرة وأضحت اســتخداماتها تعم معظم التطبيقات المختلفة بــكل القطاعات. وتعمل هذه الأجهزة الصغيــرة على تحويل الظواهر الفيزيائية الناجمة عن تغيرات معينة في البيئة المحيطة وترجمتها إلى إشــارات. لذا، يمكننا القــول إن أجهزة الاستشــعار يمكن تصنيفها من حيث الأداء إلى قســمين هما المســتقبل، والمحول. ولكي تتوافر الثقة والمصداقية فيما توفره الحساسات من معلومات وبيانات، يجب أن تتمتع بحساســية فائقــة وألا يتأثر أداؤها بالظروف المحيطة، مثل اختلاف الضغط وتغير درجات الحرارة ونسب الرطوبة. كما ينبغي أن تكون تلك الحســاســات مصنعة مــن مواد لها القدرة على تحمــل ومقاومة إجهادات الصدم والاهتزازات وجميع ظروف التشغيل الخارجية.

«أدت هذه الانتصارات العلمية المتواليــة فــي مجــال المــواد النانوية إلى تحقيق ما نشاهده اليوم من تقدم تقني مذهل في توظيــف الحســاســات لرصد المتغيرات الطارئة في الظواهر الطبيعية، وما قد يصاحبها من كوارث مدمرة..»

المؤلف

تكنولوجيا النانو وصناعة الحساسات

لـم تكن تكنولوجيـا النانو في غيبـة عن مجال الاستشـعار عن بعد المتمثل في صناعة الحساسـات وأجهزة الاستشعار المتقدمة، فقد قدمت وتقدم الدعم والمخرجات الابتكارية في إنتاج ما يعرف الآن باسـم أجهزة الاستشعار والحساسات النانوية Nanosensors التي تعد أحد أهم مخرجات تكنولوجيا النانو. وهناك كثير من الخواص والصفات التي تتمتع بها المواد النانوية وتجعلها مواد نموذجية في الاسـتخدام بمجال الاستشـعار. وقد أسهم تناهي صغر أحجام تلك الحساسات وخفة وزنها وانخفاض تكلفتها الإنتاجية في ازدهارها كي تسـتخدم في مجالات تطبيقية مهمة ومتعددة من بينهـا مجال النقل والمواصلات، مجال البناء والمرافق، الطب والرعاية الصحية، الحراسـة، الأمن والسـلامة المهنية، الأمن القومـي، العمليات العسـكرية والدفاع وإنتاج الأسلحة (1). ورجوعا إلى ما توفره الحساسات النانوية من دقة متناهية وزمن قياسـي في تحديـد هوية وتركيز الملوثات الكيميائيـة، الميكروبية والبكتيرية في البيئة المحيطة فقد وُظفت أيضا في مجال رصد التدهور البيئي والتنبؤ بالأخطار البيئية. ومن المنتظر أن تثمر الجهـود المتواصلة في مجال إنتاج المـواد النانوية المتقدمة وزيادة التمكين في التلاعب بذرات المادة، أن تزداد دقة وحساسـية أجهزة الاستشعار وأن تقل أحجامها. وقد أصبحت حساسات النانو منتجات مألوفة بعد أن غزت مجالات متعلقة بأنشـطتنا اليومية، فعلى سـبيل المثال، تلك الحساسات المسـتخدمة في الفتح الآلي لأبواب المحال التجارية، أو تلك المسـتخدمة في سيارات الركوب لمساعدة قائدها في تحديد ما حوله من أشياء خشية الارتطام بها في أثناء عملية إيقافه للسيارة في المواقف وكذلك في معرفة ورصد بيانات ضغط زيت المحرك ودرجة حرارته ومسـتوى الوقود. وتُزود الطائرات بعدد هائل من الحساسات النانوية التي يعتمد عليها الملاح الجوي فـي التعرف على العوامل الجوية الخارجيـة وارتفاع الطائرة، ومعرفة أي خلل أو عطل قد يقع في أحد أجزاء الطائرة. لذا لم يكن غريبا أن تشـهد صناعة الحساسـات هذا النمو المتواصل وذلك نظرا إلى زيادة التشـغيل الآلي وتزايد استخدام الإلكترونيات الدقيقة.

وقد أدت هـــذا الانتصارات العلمية المتوالية فـــي مجال المواد النانوية إلى تحقيق ما نشاهده اليوم من تقدم تقني مذهل في توظيف الحساسات لرصـــد المتغيـــرات الطارئة في الظواهر الطبيعية، ومـــا قد يصاحبها من كوارث مدمرة، وذلك قبل وقوعها بفترة كافية بغرض أخذ الحيطة والحذر أو التدخل الســـريع لمنع وقوعها، أو الحد من آثارها السلبية عند وقوعها. وقـــد انعكس هذا بصـــورة إيجابية في النمو الســـنوي المتصاعد لصناعة تلك الفئة المتقدمة من الحساســـات، والذي وصل هذا العام مقارنة بالعام الماضـــي إلـــى أكثر من 21%. لذا فلـــم يكن غريبا أن تنتشـــر وتروج تلك الصناعة على مستوى العالم، محققة رقما ضخما في حجم المبيعات الذي وصل إلى أكثر من ثلاثـــة مليارات دولار في العام 2008. هذا وينتظر أن يتضاعف هذا الرقم في نهاية العام 2013 ليصل إلى نحو ثمانية مليارات ونصف المليار دولار (2).

الحساسات النانوية لرصد ملوثات الهواء

تمثل مشـــكلة تلوث الهواء بأبخرة المواد الكيميائية والعضوية مشـــكلة كبيـــرة في بلدان إنتاج النفط والغاز والبلـــدان الصناعية. كما تتفاقم هذه المشـــكلة الخطيرة في معظم البلدان الناميـــة والفقيرة التي تعاني ازديادا مطردا في النمو الســـكاني، خصوصا في مناطق الكثافة السكانية العالية التي تكون متاخمة أو تقع داخل المناطق الصناعية. ومن أجل تقليل الضرر الناجـــم عن التلوث في الغلاف الجـــوي ولمنع مزيد من التدهور البيئي في تلك الدول وفي مناطق أخرى من العالم، أصبحت الحاجة ملحة إلى توفير طـــرق تكنولوجية متقدمة موثوق فـــي مصداقيتهـــا وإمكانيتها في رصد ومتابعة مســـتويات التلوث أولا فأولا وإمداد دوائر مراقبة التلوث الأرضية بتلك البيانات لحظيا فور الحصول عليها.

وقد حظيت حساســـات النانو المستخدمة في رصد واكتشاف الغازات في الهواء الجوي باهتمام الباحثين والعاملين في مجال البيئة، وذلك نظرا إلى ما توفره من دقة منقطعة النظير ليس فقط في مجال الرصد التقني الدقيق لملوثات الجو من الغازات، لكن في مجال التنبؤ بالتدهور والكوارث

البيئية أيضـــا. وقد أدى التقدم المذهل في مجـــال تحضير المواد النانوية خلال العقدين الماضيين، إلى إنتاج طائفة جديدة من مواد النانو وعائلات حديثة من تلك المواد المتقدمة تُستخدم اليوم في صناعة الحساسات فائقة الدقة، التي تؤدى وظائفها ومهامها بأقل استهلاك للطاقة.

حساسات أنابيب الكربون النانوية

اكتســبت أنابيب الكربون النانويـــة Carbon Nanotubes أهمية بالغة فـــي مجال البيئة وذلك نظرا إلى تعدد اســـتخداماتها البيئية المهمة والتي تأتي في مقدمتها صناعة أجهزة الاستشـــعار والحساسات [2]. وتستطيع حساسات أنابيب الكربون النانوية خلال ثوان قليلة اكتشاف وتعيين الملوثات الكيميائية الموجـــودة على هيئة أبخرة كيميائية فـــي الهواء الجوي، وذلك بدقة عالية. ويعتمد أســـلوب العمل في تلك الحساسات على رصد التغير الواقع في قيم الموصلية الكهربية لأنابيب الكربون، وذلك إذا ما اصطدمت بها وارتبطت معها جزيئات ملوثات البيئة الهوائية من الأبخرة الكيميائية. ويتوقف مقدار الزيادة أو النقص في تلك القيم على هوية الجزيء الغازي الذي ترتبط به جزيئاتها. فعلى سبيل المثال، عندما توجد حساسات أنابيب الكربون النانوية في بيئة ملوثة بغاز ثاني أكســيد النيتروجين NO_2 ، فإن جزيئات هذا الغاز تســبب عنـــد ارتباطها بتلك الأنابيـــب نقصا في عدد الإلكترونـــات الموجودة بها. ويرجع هذا النقص إلـــى أن عدد الإلكترونات بالمدار الخارجي لذرة النيتروجين هو سبعة إلكترونات، أي أنها تحتاج إلى إلكتـــرون واحد فقط كي يصبح مدارها الأخير مكتملا بثمانية إلكترونات، وبالتالي تصبح ذرة مســـتقرة. وعند ارتباط جزيء ثاني أكسيد النيتروجين بالسطح الخارجي لأنبوبة من أنابيب الكربون النانوية، فإنها تنتزع إلكترونا مـــن الكربون لتكمل به مدارها الخارجي، مســـببة بذلـــك تناقصا في قيم الموصلية الكهربية للأنبوبة النانوية.

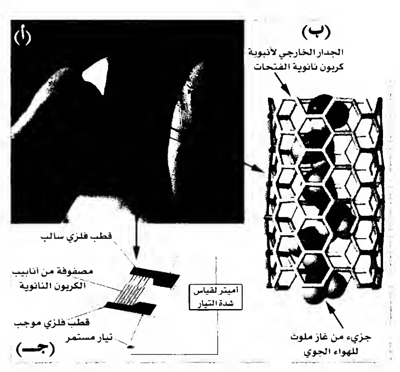
وعلى النقيض من غاز ثاني أكســـيد النيتروجـــين، فإن غاز الأمونيا NH_3 يتحد مع بخار الماء في الهواء الجوي مساهما بعدد إلكترون واحد عند ارتباطه بســـطح أنبوبة الكربون، وهذا يـــؤدي إلى زيادة في مقدار

قيمة الموصلية الكهربية لها. وقد أوضحت التجارب المعملية والحقلية أن قيم الموصلية الكهربية لحساسات أنابيب الكربون النانوية تتأثر قيمها عند ارتباط أسطح الأنابيب بجزيئات الأبخرة الكيميائية لغازات النيتروجين، الأمونيا، أول أكسيد الكربون، ثاني أكسيد الكربون، الميثان، الهيدروجين والأكسيجين (3-7).

وعلى الرغم من إمكان معرفة مدى تلوث البيئة الهوائية بالأبخرة الكيميائية في منطقة معينة، فإن إمكان تسمية الغاز وتحديد هويته ما زال يحتاج إلى كثير من البحث والتطوير. وترجع الصعوبة في تحديد هوية الغاز الملوث إلى أن مقدار الموصلية الكهربية للأنبوبة يمكن أن يتناقص (أو يزداد) مع وجود أنواع مختلفة من الأبخرة الكيميائية. وتجرى الآن أبحاث مكثفة تهدف إلى تغطية الأسطح الخارجية لأنابيب الكربون النانوية برقائق من أنواع البولمر المختلفة بحيث تُستخدم عند الرغبة في تحديد نوع معين من أنواع الأبخرة الكيميائية. فعلى سبيل المثال، عند طلاء السطح الخارجي للأنبوبة بطبقة من أنواع البولمر المعروف باسم «البولي إثيلين إميني» (Polyethyleneimine) فإنها تحجب أنبوبة الكربون عن استشعار وجود جزيء غاز الأمونيا، بينما تمكنها من استشعار جزيء غاز ثاني أكسيد النيتروجين. هذا بينما تعمل طبقة «النافيون» Nafion التي تغطي الأنبوبة على تمكين الأنبوبة من استشعار وجود جزيء غاز الأمونيا، وذلك بواسطة حجبها لجزيء غاز ثاني أكسيد النيتروجين.

والسؤال الذي قد يُطرح الآن هو كيف نتمكن من قياس التغير الواقع في قيم الموصلية الكهربية في أنابيب الكربون النانوية عند تعرض أسطحها للارتباط مع جزيء أحد الأبخرة الكيميائية؟ وللإجابة عن هذا السؤال نود أن نوضح أنه عند تصنيع جهاز الاستشعار فإنه تُوضع هذه الأنابيب بين قطبين مصنوعين من أحد الفلزات بدائرة كهربية، كما هو موضح في الشكل (13 - 1). وعند وجود أجهزة الاستشعار في جو خال من ملوثات الأبخرة الكيميائية، فإن هذا يعني عدم تراكم أي جزيئات غازية على السطح الخارجي لأنابيب الكربون النانوية لترتبط بها، وبالتالي تظل قيم موصليتها الكهربية ثابتة بلا تغير، ما يؤدي إلى ثبات في قيم التيار الكهربي

بالدائرة الكهربية. أما في حالة وجود جهاز الاستشـــعار في منطقة ملوثة بالأبخرة الكيميائية، فإن الموصليــة الكهربية لهذه الأنابيب تتغير بالنقص أو بالزيادة، ما ينعكس على تغير قيم التيار بالدائرة الكهربية، والذي يكون مؤشرا إلى تلوث المنطقة بالأبخرة الكيميائية.



الشكل (13-1): رسم تخطيطي يوضح طريقة تركيب إحدى الحساسات النانوية المؤلفة من أنابيب الكربون (أ، ج) حيث يؤدي التصاق جزيئات الغازات الملوثة للهواء بالجدران نانويــة الفتحـات (ب) إلى تغيير في قيم الموصلية الكهربية لها وبالتالي يمكن التعرف على نوع الغاز الملوث للبيئة الجوية. (المصدر: نفذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب)

الحساسات النانوية للحالة الصلبة

ينبغي أن تتمتع الحساســـات، ولاسيما الحساسات النانوية المستخدمة فـــي رصد ملوثـــات الهواء بقدرة عاليـــة على تحمل التأثيـــرات الحرارية والكيميائية المتلفة التي تتعرض لها أثناء التشغيل. وتأتي حساسات الحالة

الصلبة النانوية Solid State Nanosensors الأكثر مواءمة في الاستخدام الميداني لرصد ملوثات الهواء من الغازات، حيث تتفوق على غيرها من الأنواع بحساسيتها ودقتها العالية في التأثر بالمتغيرات التي تطرأ على البيئة الجوية المحيطة بها، خصوصا عند درجات الحرارة العالية [8]. وتصنّع تلك الفئة المهمة من الحساسات بطرق تكنولوجية مبسطة وذلك عن طريق استخدام طبقة حساسة رقيقة من أكاسيد الفلزات في طلاء قطبي الحساس. وتعد الحبيبات النانوية للأكاسيد الفلزية لثاني أكسيد القصدير SnO_2 وأول أكسيد الزنك ZnO وثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 وكذلك ثالث أكسيد التنجستن WO_3، والتي تحمل خواص مواد أشباه الموصلات [9]، أبرز المواد النموذجية التي تُوظف في صناعة الطبقات النانوية للحساسات الخاصة بمراقبة رصد الغازات بالجو والتي تعمل في درجات حرارة تتراوح ما بين 200 و400 درجة مئوية.

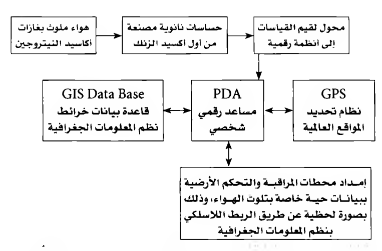
وكما هي الحال في الحساسات المبنية على أنابيب الكربون النانوية، فإن ميكانيكية العمل بحساسات الحالة الصلبة تعتمد على التغير في قيم المقاومة أو الموصلية الكهربية لطبقة الأكسيد الفلزي حينما تعلق بها جزيئات ملوثات الهواء الجوي من الغازات. هذا وتعد حساسات الحالة الصلبة النانوية المعتمدة في عملها على التغير في قيم المقاومة الأفضل وذلك في حالة التشغيل بالتيار المستمر [10].

التكامل بين تكنولوجيا النانو وتكنولوجيا الاستشعار من بعد لرصد تلوث الهواء الجوي

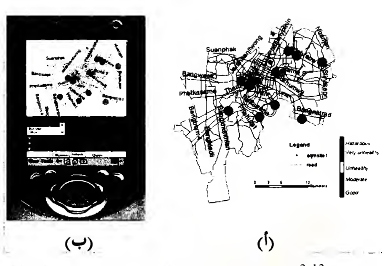
أتاحت تكنولوجيا النانو من خلال القياسات الأرضية التي تجرى بواسطة استخدام أجهزة قياسات محمولة مزودة بحساسات نانوية دقيقة، توفير طريقة اقتصادية لرصد مستويات تلوث الهواء ومتابعته لحظيا. ويتم ذلك عن طريق ربط هذه الأجهزة لاسلكيا بنظم المعلومات الجغرافية (GIS)، Geographical Information Systems. ويتكامل هذا الجهاز المحمول، المحتوي على حساسات نانوية، لتحقيق المتابعة اللحظية للتلوث الجوي، عن طريق ربطه بالمساعد الرقمي الشخصي Personal

Digital Assistance (PDA) بواسطة البلوتوث Bluetooth ونظام تحديد المواقع العالمي Global Positioning System (GPS)، ما يسمح بالنشر السريع للمعلومات الخاصة بمستويات التلوث في مواقع مختلفة في وقت واحد. ويلخص الشكل (13 - 2) الإطار العام لكيفية توظيف ودمج تقنيتي تكنولوجيا النانو متمثلة في الحساسات النانوية مع نظم المعلومات الجغرافية والموظفتين لاكتشاف التلوث الجوي في العاصمة التايلندية بانكوك بغازات أكاسيد النيتروجين (11).

هذا ويصور الشكل (13 - 3 «أ») خريطة لمدينة بانكوك التايلندية، التي تعد مخرجا من مخرجات التكامل بين تكنولوجيا النانو ونظم المعلومات الجغرافية، عالية الدقة موزعا عليها نسب وجود غازات أكاسيد النيتروجين في المناطق الصناعية المتاخمة للأحياء السكنية. ويبين الشكل (13 - 3 «ب») الصورة المنقولة إلى جهاز المساعد الرقمي الشخصي الموجود مع أفراد محطات المراقبة الأرضية والمرسلة من خلال الربط بشبكة نظم المعلومات الجغرافية في مدينة بانكوك التايلندية (11).



الشكل (13-2): اندماج مفاهيم تكنولوجيا النانو وتكاملها مع نظم المعلومات الجغرافية لرصد غازات أكاسيد النيتروجين عن طريق استخدام حساسات أول أكسيد الزنك النانوية. (أعيد تصميم الشكل الموجود بمصدره الأصلي بالمرجع رقم 11)



(ب) (أ)

الشكل (13-3): خريطة مبينة عليها توزيعات غازات أكاسيد النيتروجين في مناطق مدينة بانكوك في تايلند (أ). وفي الشكل (ب) صورة الخريطة الموضحة في (أ) بعد أن أرسلت لاسلكيا عبر الربط بشبكة نظم المعلومات الجغرافية في مدينة بانكوك التايلندية إلى جهاز المساعد الرقمي الشخصي الموجود مع طاقم أفراد المراقبة الأرضية.
(المصدر: نُظّم الشكل الموجود بالمصدر (11) بواسطة مؤلف هذا الكتاب)

تقييم البيئة البحرية بواسطة حساسات النانو

يمثل تقييم البيئة البحرية ورصد الملوثات البحرية ضرورة ملحة تفرض نفسها نظرا إلى ما تمثله تلك البيئة من أهمية بالغة خاصة مع ازدياد التهديدات التي تواجه البحار والمحيطات والمتمثلة في تزايد الملوثات والمخلفات الهيدروكربونية فيها. وقد أدى البحث والتطوير في مجال الحساسات إلى إنتاج أنواع متقدمة من تلك الحساسات النانوية تعرف باسم حساسات الهيدروكربون النانو الكيميائية Nanochemical Hydrocarbon Sensors (12). وتمثل تلك الحساسات أهمية بالغة ليس فقط في مجال البيئة البحرية والمتمثلة في الكشف عن الملوثات الهيدروكربونية، والتمييز بين مختلف أنواعها بل أيضا في رصد المواد الهيدروكربونية المتسربة من آبار الغاز والبترول غير المستغلة والموجودة في قاع البحار والمحيطات والتفرقة بينها وبين الملوثات العضوية للمياه.

الحساسات النانوية لرصد وتعقب حرائق الغابات

بالإضافة إلى توظيف الحساسات النانوية في رصد ملوثات الهواء الجوي، فقد استخدمت الوكالة الوطنية للملاحة الفضائية ووكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) NASA أنواعا متقدمة من الحساسات الحرارية نانوية التركيب Thermal Nanosensors في رصد وتعقب حرائق الغابات التي اندلعت بولاية كاليفورنيا الأمريكية في أكتوبر من العام 2007 وذلك باستخدام تقنية التصوير الحراري Thermal-imaging [13]. وقد أقدمت ناسا على هذه الخطوة المهمة بعد أن عجزت الطائرات التي أقلعت لتحلق فوق مناطق الحرائق المندلعة عن وضع خرائط دقيقة لمواقع اندلاع النيران وتعقب زحفها إلى المناطق المتاخمة، وذلك بسبب ظروف الطقس السيئة في تلك المناطق المنكوبة التي كان لها الأثر السيئ الذي حال دون إنجاز الطائرات تلك المهمة الصعبة. لذا فلم يكن أمام مركز الحرائق الوطني الأمريكي غير أن يدعو وكالة ناسا إلى استخدام مركبة جوية من دون طيار مزودة بأجهزة استشعار حراري نانوية متقدمة للمساعدة في تتبع ورصد تلك الحرائق المستعرة، واضعة بذلك التطبيق بعدا مهما للحساسات النانوية وتحديا جديدا من ضمن التحديات التي تواجه تكنولوجيا النانو يوما من بعد يوم.

وقد استمرت المهمة لمدة ثلاثة أيام كاملة حلّقت فيها المركبة الجوية فوق مناطق الحرائق المختلفة حيث التُقطت صور الحرائق وعولجت ورُسِمَت خرائط لمناطق وجودها وزحفها. وقد أُرسلت هذه البيانات والخرائط إلى مراكز المراقبة والمتابعة الأرضية إرسالا حيا مباشرا فور التقاطها ومعالجتها على متن المركبة، مما أتاح لمتخذي القرار وفرق مكافحة الحرائق وضع خططهم الملائمة لمكافحة وإخماد الحرائق ومحاصرتها بهدف منعها من الامتداد إلى مناطق متاخمة.

وقد أفاد التقرير النهائي الذي أُعد بواسطة فريق العمل الذي قاد هذه المهمة، وبالتنسيق مع العلماء والباحثين في وكالة ناسا الفضائية، في أنه بالمقارنة مع الحساسات التقليدية المستخدمة في رسم خرائط حرائق الغابات عن طريق تقنية المسح الخطي Line Scanning فإن حساسات النانو الحرارية قد وفرت دقة متناهية وحساسية فائقة في المدى الحراري

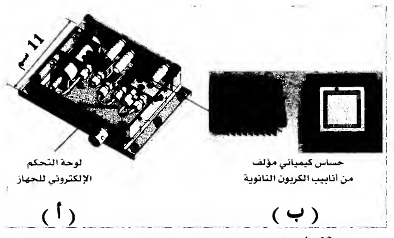
عــلاوة على قدرتها الفائقة في تعقب تلك الحرائق. وقد كان لهذا كله أبلغ الأثــر في تأدية رجال مركز الحرائق الوطنــي الأمريكي مهمتهم الصعبة. يأتي هذا بالإضافة إلــى ما وفرته تلك التقنية الحديثة من مزايا متقدمة تتمثل في القدرة على التقاط ومعالجة الصور وإرسالها إرسالا حيا، وذلك على النقيض من التقنيات الســابقة التي كانت تتطلب كثيرا من الوقت في تحليل البيانات، وبالتالي عدم القدرة على إرســال بيانات موثوق في دقتها بصورة مباشرة وحية.

حساسات النانو في خدمة رحلات الفضاء الخارجي

قامت وكالة ناســا الفضائية في ربيع العام 2007 بخطوة رائدة حيث تمكنــت لأول مرة في تاريخ البشــرية من تصنيع إحدى حساســات النانو الكيميائية واختبارها على متن إحدى المركبات الفضائية [14].

وقــد برهنت التجربة على نجاح تلك الحساســات المتقدمة في العمل في الفضاء الخارجي وقدرتها الفائقة على تعيين وتحليل المقادير الضئيلة لملوثــات الهواء في داخل المركبة الفضائية. ولا شــك فــي أن وجود هذه النســب من ملوثات الهــواء الداخلي للمركبة الفضائيــة، على الرغم من ضآلتها، قد يسبب تهديدا كبيرا لطاقم الملاحة وذلك نظرا إلى تراكم تلك الملوثات وزيادتها في المركبــة الفضائية المغلقة، خصوصا خلال الرحلات الطويلة التي قد تمتد إلى أشهر عدة.

وقــد طُوعت تكنولوجيا النانو متمثلة في تقنية النظم الكهروميكانيكية الصغرى MEMS، Micro Electro Mechanical System في تصنيع هذا الجهاز. ويوضح الشــكل (13 - 4 «أ») رسما تخطيطيا للتركيب الداخلي لجهاز الاستشــعار الذي اســتُخدم في تلك الرحلة الفضائية والمؤلف من مجموعة من الإلكترونيات ترتبط بحســاس نانوي (الشــكل 13 - 4 «أ») مثبت معها بلوحة الإلكترونيات الرئيسية بالجهاز. وقد استخدمت أنابيب الكربون النانوية في تركيب ذلك الحساس الكيميائي وذلك نظرا إلى الدقة المتناهية التي تبديها هذه المواد النانوية المتقدمة في تعيين وتحليل الكميات الضئيلة جدا من الغازات المتسربة في الهواء وتحديد أنواعها.



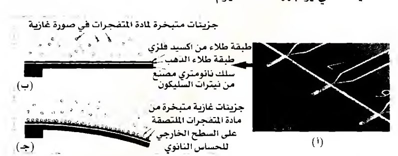
الشكل (13 - 4) : (أ) رسم تخطيطي لجهاز الاستشعار الذي حملته المركبة الفضائية التابعة لوكالة ناسا الفضائية في رحلتها في ربيع العام 2007، مبينا به وحدة الحساس الكيميائي (ب) المخصص لرصد وتعيين الملوثات الغازية للمركبة وتحليلها.
(المصدر: نظم الشكل الموجود في المصدر (14) بواسطة مؤلف هذا الكتاب)

حساسات النانو الكيميائية في الكشف عن الألغام والمتفجرات

انتشـرت منذ ثمانينيات القرن الماضي العمليات الإرهابية المعتمدة على زرع الألغام والمتفجرات في السيارات والأماكن العامة، حيث تستخدم كشراك موقوتة لاستهداف الضحايا وحصد المدنيين الأبرياء. ونتيجة لتزايد إنتاج أنواع حديثة من تلك القنابل الموقوتة التي تتصف بخفة الوزن وصغر الحجم وارتفاع قدرتها التدميرية، وفي إطار هذا التقدم الهائل في صناعة تلك المتفجرات الفتاكة، أضحت طرق الكشف المتاحة عن تلك المتفجرات ومعرفة هويتها وتركيبها من العمليات المعقدة والمكلفة، وذلك نظرا إلى وجود طائفة واسعة من المواد التي يمكن استخدامها في صنع هذه المتفجرات.

وعلى الرغم من وجود أنواع مختلفة من الحساسات توضع في الأماكن الاستراتيجية والحيوية مثل المطارات وبعض المباني الحكومية بهدف الكشف عن هذه المتفجرات والمفرقعات، فإن كبر أحجامها وانخفاض حساسيتها علاوة على طول الفترة الزمنية التي تتطلبها لأداء مهامها، كل ذلك يجعلها قاصرة عن استيفاء الخواص التي يجب توافرها في حساسات استكشاف

المتفجـرات بشــكل مرض. هذا بالإضافــة إلى صعوبة تكثيــف توزيعها في أماكن مهمة أخرى مثل مواقف الســيارات المنتشــرة الآن في المباني والمراكز التجارية، ودور المســرح والسينما وشبكات الصرف تحت السطحية، الطرق، الكباري والأنفاق ودور العبادة وغير ذلك من أماكن تجمع المدنيين، والتي تعد هدفــا لتلك العمليات الإرهابية. هــذا بالإضافة إلى صعوبة الربط بين تلك الحساســات من خلال شبكة أرضية تكون قادرة على رصد واكتشاف أماكن وجود المتفجرات ونوع المادة المســتخدمة وإرســال تلــك البيانات لحظيا إلى مركز القيادة والتحكم من خلال ربطها بالشــبكة العنكبوتية لنظم المعلومات الجغرافية الموجود في أي دولة، مما يتيح تلقي تلك البيانات بصورة حية أولا فــأولا. ومن ثم، وفي ظل تلك الصعاب التقنيــة فقد أضحى مجال مكافحة الإرهاب المتمثل في الكشــف عن المتفجرات والقنابل الموقوتة يمثل أحد أكبر التحديات التي يواجهها عالمنا اليوم.



الشــكل (13 - 5): (أ) صــورة مجهريــة باســتخدام الميكروســكوب الماســح الإلكترونــي لمجموعة من حساسات النانو الكيميائية المستخدمة في استشعار مواد المتفجرات والقنابل الموقوتة. (ب) يوضح الشــكل رســما تخطيطيا لإحدى الحساســات الموضحة في الشــكل (أ) مبينا عليه التركيب الهيكلي المكون من سلك نانوي على هيئة كابول Cantilever من مادة نيترات الســيليكون مغطاة بطبقة نانوية من فلز الذهب النقي المغلف بطبقة نانوية رقيقة من أحد الأكاســيد الفلزية. ويوضح الشــكل وجود جزيئات متبخرة للمادة المتفجرة تحيط بالحساس ما يدل على وجود شرك أو لغم متفجر في المنطقة المحيطة بالحساس. (ج) يبين هذا الشــكل الانحناء الحادث في كابول الحســاس فور التصاق جزيئات بخار المادة المتفجرة علــى ســطحه التي تمتز. ويؤدي امتزاز تلك الجزيئات الغازيــة للمادة المتفجرة إلى تناقص في قيمة الطاقة الحرة المسببة للإجهادات السطحية.

ومــع اختــلاف قيم طاقــة الربط المســؤولة عــن التصاق الجزيئــات المتبخرة بالســطح الخارجي لكابول الحساس بين مادة وأخرى يمكن التعرف على هوية المادة المتفجرة.

(المصدر: نظم الشكل الموجود في المصدر (15) وإضافة الشرح والتعليق بواسطة مؤلف هذا الكتاب)

ولا شــك في أن غياب انتشــار حساسات الكشــف عن المتفجرات في الأماكــن المختلفة وفقدان القــدرة على تكثيف توزيعها فــي الأماكن التي عادة مــا تكون هدفا لتنفيذ العمليات الإرهابية يفقد أي دولة مصداقيتها وهيبتهــا في حماية جبهتها الداخلية، ما يعني تشــجيع الإرهابيين بصورة غير مباشرة في مواصلة عملياتهم الإجرامية داخل تلك الدولة. ولم تبخل تكنولوجيا النانو في توفيــر الحلول التقنية الخاصة بتقديم مصغرات من أجهزة الاستشــعار [15] خفيفة الوزن وصغيرة الحجم تنفرد بحساســيتها الفائقة في التمييز بين المواد المتفجرة وتصنيفها بدقة عالية. كما تتميز تلك الحساســات النانوية بانخفاض تكلفتها الصناعية ما يتيح إنتاجها بطريقة اقتصاديــة. وترتكز فكرة عمــل تلك الحساســات الكيميائية على تصيد جزيئات المواد العضوية المســتخدمة في صناعــة المفرقعات، وذلك نظرا إلى أن تلك المواد تكون ذات درجات حرارة غليان منخفضة، ما يعني تبخر نســب ضئيلة من جزيئاتها عند درجة حرارة الغرفة ما يتيح للحساســات الكيميائية تصيد تلك الجزيئات وتحليلها وإرسال إشارات لاسلكية لشبكة نظم المعلومات الجغرافية GIS التي ترســلها إلى الأجهزة المحمولة لنظام تحديد المواقع العالمــي GPS لدى فرق المتابعة والمراقبة الأرضية. وتُصدر هذه البيانات والمعلومات وفقا للإحداثيات الثلاثية الخاصة بكل حســاس، ومن ثم يمكن تحديد موقع وجود اللغم أو الشــرك بسهولة ودقة والتدخل الفوري لإبطاله.



14

النانو بين مؤيد ومعارض

«إن الخطر الحقيقي الذي يمكن أن نتأثر به كدول نامية من جراء تطبيقات تكنولوجيا النانو هو التخلف عن ركبها. كما حدث سابقا في التكنولوجيا الأخرى التي تخلفنا عن اللحاق بها»

المؤلف

بعد أن استعرضنا ماهية تكنولوجيا النانو والتعرف على تطبيقاتها الرائدة في المجالات المختلفة، أصبح من المنطقي أن نتعرف على حجم الاستثمار الحالي والمتوقع في هذه التكنولوجيا المتقدمة. وعلى الرغم من صعوبة تحديد المجالات القائمة على تكنولوجيا النانو والتي سوف يكون لها التأثير الأكبر في الاقتصاد العالمي، فإنه من المرجح أن تهيمن تكنولوجيا النانو بتطبيقاتها المتعددة على الاقتصاد العالمي خلال السنوات العشر القادمة من هذا القرن. ووفقا للدراسات التي أجرتها المؤسسة الوطنية للعلوم في الولايات المتحدة الأمريكية National Science Foundation (NSF)، فإن حجم الاستثمار القائم على تكنولوجيا النانو سوف يصل إلى تريليون دولار أمريكي

بعد خمس سـنوات مـن الآن، أي في بدايـة العام 2015. هـذا بينما تتوقع الدراسـات اليابانية أنه سوف يتخطى هذا الرقم بكثير، حيث ترجح أن يصل إلى نحو 3.5 تريليون دولار في السنة نفسها! وعموما، وبغض النظر عن مدى صحة تلك الأرقام، فإن مجال تكنولوجيا النانو قد اسـتقطب عددا كبيرا من الشركات الصناعية الكُبرى في العالم، اللاهثة وراء تحقيق مكاسب اقتصادية ضخمة لاسـتعادة أوضاعها المالية وتثبيت نفوذها في بورصات الأوراق المالية، التي أصابها الخمول والتردي نتيجة الكسـاد والركود اللذين خيما على عالمنا منذ فترة. وفي ضوء كل الدراسـات الاقتصادية التي أجرتها كثير من الهيئات البحثية، الصناعية، وحكومات الـدول الصناعية الكبرى، فإنه من المنتظر أن يمثل اقتصاد تكنولوجيا النانو قوة هائلة تفوق في حجم اسـتثماراتها مجموع حجم الاستثمارات العالمية في كل الصناعات مجتمعة.

تكنولوجيا النانو وآثارها في المجتمع

كان من الطبيعي أن يؤدي انفراد نجم تكنولوجيا النانو بالسطوع في سماء العلم والتكنولوجيا، وحـرص زعماء دول العالم في الحفاظ على بريقه ولمعانه بضخهم مخصصات مالية كبيـرة لإدارة وتعزيز البرامج البحثية النانوية، إلى جـذب فئات مختلفة ومتناقضة من البشـر إلى فلكه، مـن جميع الاتجاهات والميـول والثقافات والتخصصات. فلقد جذب نجم تكنولوجيا النانو إليه كثيرا مـن المناصرين والمؤيدين من أبناء التخصص، الذين بحدسـهم العلمي المتميز وسنوات خبرتهم الطويلة، يرون أن تلك التكنولوجيا تمثل الملاذ الأخير للبشرية في الخلاص من همومها ومشاكلها التي عجزت التكنولوجيات الأخرى عن إيجاد حلول عملية لها. وقد ساءت البعض من خارج التخصص رؤية هذا النجم وهو يستأثر بهذا القدر الضخم من الاهتمام الحكومي والشعبي والإعلامي في كل دول العالم. لذا، فقد صُورَ لهم قرب أفول تخصصاتهم المهمة، وهم بهذا التصور لم يدركوا طبيعة تكنولوجيا النانو المبنية على التعاون والمشـاركة البحثية. وقد تبنـى فريق منهم حركة لمناهضة تطبيقات تكنولوجيا النانو ومكافحة توظيفها في المجالات المختلفة، محاولين برجمهم لها بسمات وصفات غريبة عليها وعلى فلسفتها، أن يثيروا سخط واستياء رجل الشارع، وأن يكسبوا تأييده، خاصة بعد

أن نسبوا إليها بعدا غير أخلاقي، لم تكن تهدف إليه على الإطلاق. وقد تفرع عن هذا الفريق، جماعة رأت أن تجني مكاسب شخصية عن طريق اقتحامها لهذا المجال، مدعية أحقيتها وأهليتها في ذلك! وبين شد وجذب، ومبدع ومتسلق، وعالم ومبتدئ، وصانع ومستهلك، مضت سفينة النانو، ببحاريها المتخصصين، تصول وتجول في بحار ومحيطات التطبيقات المختلفة.

• دروس مُستفادة من التكنولوجيا الحيوية

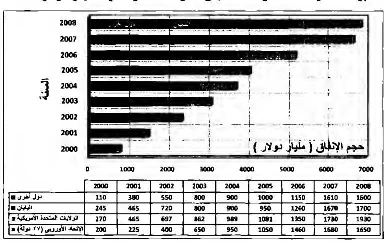
تتعرض تكنولوجيا النانو، ومنذ فترة، لعاصفة من الانتقادات والاتهامات، تذكرنا بما تعرضت له التكنولوجيا الحيوية - البيوتكنولوجي - من جدل حين أظهرت مقدرتها الفائقة على التلاعب في ترتيب جينات الحمض النووي، وإنتاج محاصيل زراعية متميزة، عن طريق تقنية التعديل الجيني الوراثي. ومثلت الاعتراضات في تلك الفترة تخوفا من أن تنتهج التكنولوجيا الحيوية مستقبلا، المنهج نفسه، أو تسير على الخط البحثي عينه بتعديل جينات الحمض النووي في الإنسان والكائنات الحية الأخرى.

وقد أثارت مثل هذه الشكوك بتلك الحقبة السابقة، حفيظة رجال الدين من الديانات المختلفة ومن المذاهب كافة، فأمطروها - أي التكنولوجيا الحيوية - بوابل من الاتهامات، وألصقوا بها كثيرا من الإدانات والانتقادات الدينية العنيفة، وكأن عجلة التاريخ تعود بنفسها إلى عصور أوروبا المظلمة إبان القرون الوسطى.

لذا، فقد واجهت التكنولوجيا الحيوية عقبات ضخمة، تمثلت في انقسام المجتمع المدني تجاهها، ما بين رفض وقبول، الأمر الذي أدى بالمنظمات الدولية وحكومات الدول المعنية - المُنتجة أو المستهلكة - والعلماء المتخصصين، وأفراد المجتمعات المدنية في كل أرجاء العالم، لأن يجتمعوا ويتناقشوا في اجتماعات مطولة، من أجل وضع المعايير الدولية والأطر البحثية الملزمة، من خلال سن مجموعة من القوانين الأخلاقية الصارمة، وذلك لضمان عدم جموح إبداعات علماء التخصص إلى آفاق بحثية أخرى. ويرى كثيرون أن تلك المناقشات الجدلية، قد حرمت البشرية لعهد طويل من جني ثمار التكنولوجيا الحيوية، وكبحت جماح الإبداعات العلمية للباحثين، الرامية إلى تحسين صحة الإنسان من خلال تعظيم موارد غذائه وتطويرها.

الإنفاق الدولي على أنشطة النانو البحثية

لم يأت تصدر الدول المهتمة بمجال تكنولوجيا النانو، والتي وصل عددها اليوم إلى 52 دولــة، لقائمة العالم في المعرفة «النانو تكنولوجية» من فراغ. فقــد تنبهت تلــك الدول منذ محاضــرة فينمان في العــام 1956، لأهمية الدور الحيوي المهم الذي سوف تؤديه تلك التكنولوجيا خلال القرن الحادي والعشرين، وســوف تتحكم في مجرياته وآلياته تلك المواد الدقيقة المتناهية الصغر. لذا، فقد كان لزاما عليها أن تنفق بسخاء على برامج ومراكز التميز لعلــم وتكنولوجيا النانو. ويبين الشــكل (14 - 1) حجم الإنفاق العالمي في دعــم البرامج البحثية الخاصة بتكنولوجيا النانو، والذي وصل خلال الفترة ما بين العامين 2000 و2008، إلى نحو خمسة وثلاثين مليار دولار [(1-5)].



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
دول أخرى ■	110	380	550	800	900	1000	1150	1610	1600
اليابان ■	245	465	720	800	900	950	1260	1670	1700
الولايات المتحدة الأمريكية ■	270	465	697	862	989	1081	1350	1730	1930
الإتحاد الأوروبي (٢٧ دولة) ■	200	225	400	650	950	1050	1460	1680	1650

الشكل (14 - 1): حجم الإنفاق العالمي المخصص لتأسيس برامج ومراكز تميز لعلوم وتكنولوجيا النانو، موزعا على الدول الأكثر إنفاقا، خلال الفترة ما بين العامين 2000 و 2008. (الشكل تم تنفيذه بواسطة المؤلف اعتمادا على البيانات الإحصائية المستقاة من المراجع 1 - 5).

● النشر العلمي

تتربع تكنولوجيا النانو على قائمة الاهتمامات العلمية والبحثية في جميع دول العالم، حيث قامت 52 دولة خلال الســنوات التسع المنصرمة (2000 - 2009) بتأســيس برامج ووحدات بحثية وأكاديمية، معاهد بحوث ومراكز تميــز، وصل عددها مع نهاية العام 2009 إلى 24468. هذا على الرغم من

أن عدد الدول المشـاركة في النشـر العلمي بالدوريات المتخصصة قد وصل في العام نفسه إلى 156 دولة، من مجموع الـدول الأعضاء بالأمم المتحدة وعددها 192 دولة. ومنذ دخول البشـرية ألفيتهـا الثالثة وحتى يومنا هذا، تتنافس دور النشـر العالمية في إصدار دوريـات جديدة متخصصة في علم وتكنولوجيا النانو، تسـتقطب بها العلماء والباحثين العاملين في هذا المجال مـن كل أنحاء العالم. هذا بالإضافة إلى ما يشـهده العالم اليوم من سـباق بشـأن تنظيم مؤتمرات دوليـة، وندوات وورش عمل عـن تكنولوجيا النانو، بما يقـرب من ندوة أو مؤتمر يُنظم يوميا! هذا، وقد بلغ عدد تلك الدوريات العلمية والمحافل الدولية حتى ديسمبر 2009 نحو 4175 [6-8]. وفي خلال تلك الفترة، نُشر نحو 193475 ورقة بحثية من مختلف أرجاء العالم.

وفـي إطار ما أُتيح لي من معلومات خاصة بالنشـر العلمي العالمي في مجـال علم وتكنولوجيا النانو خـلال تلك الفتـرة [8]، يمكننا ترتيب تلك الأبحاث المنشورة وفقا لما حظيت به من اهتمام وتنافس بحثي على مستوى العالم، كما هو مبين في الجدول (14 - 1).

الجدول (14 - 1): ترتيب المجالات التطبيقية لتكنولوجيا النانو وفقا لكثافة النشر العلمي بالدوريات العالمية المتخصصة خلال الفترة ما بين العامين 2000 و2009.
(تم تصنيف المجالات وترتيبها وفقا للبيانات المُستقاة من المراجع 6 - 8).

المجال البحثي	الترتيب	المجال البحثي	الترتيب
الإلكترونيات النانوية	الأول	العمليات الفيزيائية الخاصة بالنانو	السادس
تطبيقات النانو في مجال الطب، اكتشاف الأمراض والأدوية	الثاني	تطبيقات النانو في مجال البصريات	السابع
التصنيع الجزيئي والتجميع الذاتي	الثالث	تطبيقات النانو في مجال التكنولوجيا الحيوية	الثامن
تطبيقات النانو في مجال الطاقة الجديدة والمتجددة	الرابع	تطبيقات النانو في صناعة المُحفزات الكيميائية	التاسع
تصنيع مواد الطلاء نانوية السمك	الخامس	اكتشافات تقنيات جديدة خاصة بإنتاج وتوصيف المواد النانوية	العاشر

وفي ضوء المعلومات نفسها المُستقاة من المراجع السابق ذكرها، رأيت تصميم شكل مبسط يعرض خريطة العالم، مُبينا عليها أكثر الدول اهتماما بالأنشطة البحثية والتكنولوجية المُتعلقة بمجال تكنولوجيا النانو، وذلك خلال نفس الفترة الزمنية السابق التحدث عنها (2000 - 2008). وقد أشرنا إلى تلك الدول في الشكل (14 - 4)، وفقا لحصيلتها من النشر العلمي في الموضوعات العلمية والتقنية المتعلقة بالنانو، التي زادت على 1000 ورقة بحثية منشورة بالدوريات العالمية خلال الفترة المذكورة سلفا.



الشكل (14 - 2): خريطة العالم مبينا عليها الدول الأكثر مساهمة في مجال البحث العلمي ونشر الأوراق البحثية بالدوريات العلمية العالمية المتخصصة، خلال الفترة مابين العامين 2000 و 2008 (تعتمد البيانات الموضحة بالشكل، على ما أُتيح للمؤلف من معلومات مُستقاة من المراجع 6 - 8).

اقتصاد النانو

كما ذكرنا سلفا، فرضت تكنولوجيا النانو نفسها وبقوة على المجتمع العلمي والمدني على حد سواء، وذلك لأنها التكنولوجيا الوحيدة القادرة على دمج العلوم الأساسية، وكثير من التقنيات التكنولوجية المتقدمة وصهرها في بوتقة واحدة. وقد أدى تطبيق تقنيات تكنولوجيا النانو بالقطاعات الصناعية المختلفة إلى تطوير في مفهوم وفلسفة الإنتاج والتصنيع، مما انعكس بالإيجاب على خصال وصفات المُنتَجات والسلع، الأمر الذي أدى إلى ابتكار تطبيقات حديثة لم تكن معروفة من قبل. ولم يكن غريبا أن تحظى تكنولوجيا النانو بهذا الاهتمام المتزايد من قبل متخذي القرار

في حكومات الدول الصناعية الكبرى ومؤسساتها الإنتاجية والبحثية بعد أن ظلت طويلا ترتبط بأفلام الخيال العلمي التي نُسجت عنها كثير من الروايات الأسطورية والمعجزات الخيالية طوال العقود الأربعة الأخيرة من القرن الماضي.

وقد استخدمت هنا مصطلح «اقتصاد النانو»، للتعبير عن كل الأنشطة التجارية المتعلقة بمُخرجات تكنولوجيا النانو، من إنتاج وبيع أو شراء للسلع والمنتجات النانوية Nano-products. ومما لا شك فيه، أن المُنتجات والسلع النانوية أضحت هدفا استثماريا كبيرا للشركات الصناعية والتجارية في تحقيق نسب هائلة من الأرباح، في سوق عالمية تعاني من الكساد. وأصبح الآن، كل مُنتج يرتبط اسمه بكلمة «نانو Nan»، أو تعتمد تكنولوجيا تصنيعه عليها، محط أنظار المستهلكين من كل أنحاء العالم، حيث يلقى رواجا تجاريا منقطع النظير من قبل المستهلك العادي.

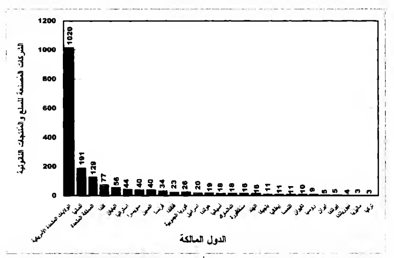
● الاستثمار في تكنولوجيا النانو

دخلت الدول الصناعية وشركاتها منذ مطلع هذا القرن، في منافسات شرسة حامية الوطيس، تهدف إلى زعامة الأنشطة البحثية والتطبيقية لتكنولوجيا النانو، واحتكار مخرجاتها المتقدمة وذلك عن طريق براءات الاختراع وقوانين الملكية الفكرية الصارمة. ويُخطئ من يظن أن هذا الاهتمام قد تولد من منطلق مسايرة «الوجاهة» أو «الترف البحثي»، لكنه جاء تأكيدا وترسيخا لنظم ومفاهيم اجتماعية جديدة، وخلق مصادر مؤكدة للاستثمار المبني على العلم والتكنولوجيا وليس على تراكم رؤوس الأموال. وقد برهنت الكبوة الاقتصادية التي أطلت بوجهها القبيح على العالم بأسره، بعد ظهيرة يوم تعيس من أيام خريف العام 2008، على فشل ثقافة الاستثمار المبني على المضاربة برؤوس الأموال في تحقيق مكاسب سريعة (9). كما أكدت تبعيات تلك الكبوة الاقتصادية المريرة، أهمية الدور الذي تؤديه العلوم والتكنولوجيا في بناء اقتصاد قوي ثابت، مبني على المعرفة التكنولوجية، والتي تعد «تكنولوجيا النانو» المعول الرئيسي له، وأداته الاستراتيجية لتشييد صرحه.

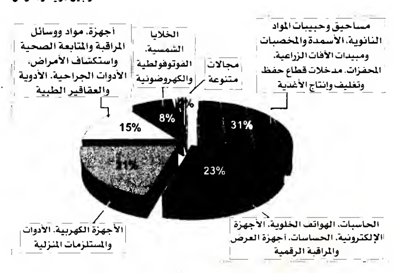
• منتجات النانو بالأسواق

وتمارس اليوم تكنولوجيا النانو، دورا رياديا مهما في إنعاش سوق التجارة العالمي، من خلال طرحها لسلعها ومنتجاتها التي يزداد وجودها في الأسواق يوما بعد يوم، بعد أن غزت كل مجالات الإنتاج. وقد كان لذلك أبلغ الأثر في أن ترتبط المُنتجات النانوية بمعاني الإبداع والانفراد، وأن تحمل في طياتها صفـات الجودة والتميـز. من منا لم يلاحظ هذا الـرواج التجاري الضخم والمتزايـد، الذي تحققه مبيعات الأجهزة المحمولة، مثل أجهزة الحواسـب، الهواتف المحمولة، وأجهزة تسـجيل وتشغيل الموسـيقى، الأغاني والأفلام، القادرة على تخزين كم هائل من تلك الملفات في أحجام صغيرة جدا؟

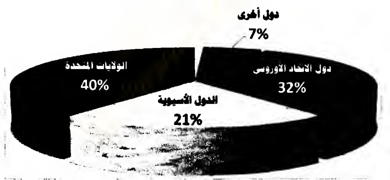
وتقوم اليوم أكثر من 1860 شـركة تنتمي لسـبع وعشرين دولة من دول العالـم (الشـكل 14 - 3) بإنتاج سـلع ومنتجات نانويـة مختلفة، بلغ حجم مبيعاتها في العام 2007 نحو 146 مليار دولار [10]. ويبين الشكل (14 - 4) النسب المئوية لمبيعات الفئات المختلفة من المنتجات النانوية العام 2008 [11]، موزعة وفق المجالات التطبيقية لكل فئة. هذا بينما، يوضح الشكل (14 - 5) النسب المئوية لحصص الدول المُنتجة من تلك المبيعات.



الشـكل (14 - 3): توزيـع الشـركات المُنتجـة للسـلع النانويـة علـى الـدول السـبع والعشـرين الرئيسـية فـي العالم، المالكة لتلك الشـركات. (الشـكل تم تنفيذه بواسـطة المؤلف اعتمادا على البيانات الإحصائية المُستقاة من المرجع 10).



الشكل (14 - 4): النسب المئوية لمبيعات الفئات المختلفة من المنتجات النانوية التي سُوقت في العام 2008، موزعة وفق المجالات التطبيقية لكل فئة. (الشكل تم تنفيذه بواسطة المؤلف اعتمادا على البيانات الإحصائية المستقاة من المرجع 11).



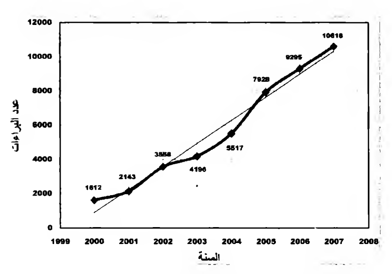
الشكل (14 - 5): النسب المئوية لمبيعات الفئات المختلفة من المنتجات النانوية التي تم تسويقها في العام 2008، موزعة وفق المجالات التطبيقية لكل فئة. (الشكل تم تنفيذه بواسطة المؤلف اعتمادا على البيانات الإحصائية المستقاة من المرجع 11).

● **براءات الاختراع لحماية منتجات النانو**

كان من البديهي وسط هذا التنافس العالمي الكبير الخاص بإنتاج السلع والمنتجات النانوية، وابتكار أساليب جديدة في الإنتاج والتوصيف، أن تقوم الجامعات والمعاهدالبحثية، إلى جانب شركات

الإنتـــاج، علـــى حماية مبتكراتهـــا التكنولوجية، وأن تحتكر لنفســـها التفاصيل التقنيـــة الدقيقة المتعلقة بعمليات الإنتاج والتصنيع، وذلك عـــن طريق براءات الاختراع. وقد وصل عـــدد براءات الاختراع التي حصلت عليهـــا تلك الجهات فـــي المواضيع المتعلقة بالمـــواد النانوية والتكنولوجيـــا القائمة عليهـــا، خلال الفترة ما بـــين العامين 2000 و2007، إلى 44867 براءة (12-15).

ويبين الشكل (14 – 6) العدد الإجمالي لبراءات الاختراع الممنوحة في مواضيع متعلقـــة بتكنولوجيا وتطبيقات النانو خلال الفترة ما بين العامين 2000 و2007، موزعة على كل ســـنة من سنوات تلك الفترة. ويمكننا من هذا الشـــكل، حســـاب متوســـط معدل النمو السنوي في أعـــداد تلك البراءات في هذه الفترة المذكـــورة، والذي وصل إلى نحو 18 فـــي المائة، مما يعكس نموا مطردا في حجـــم قطاع الإنتاج «النانو تكنولوجـــي»، وازدياد حجم المنتجات النانويـــة القائمة التي تُضخ إلى الأسواق سنويا (16).



الشكل (14 - 6): عدد براءات الاختراع الخاصة بتكنولوجيا النانو موزعة على سنوات الفتـرة مـا بـين العامين 2000 و 2007 (الشـكل تم تنفيذه بواسـطة المؤلـف اعتمادا على البيانات الإحصائية المستقاة من المراجع 12 - 15).

المكاسب العائدة على المجتمع المدني

في إطـــار التطبيقات الرائـــدة لتكنولوجيا النانـــو، ومنتجاتها الفريدة والمتميزة، والتي عرضناها سلفا، فإن دول العالم بأسره، سوف يتحقق لها كثير من المكاسب المختلفة، يمكن إيجازها في النقاط التالية:

- **مجال البيئة**
  - معالجة التربة والمياه الجوفية الملوثة.
  - تخفيض معدلات استهلاك المواد الخام، من خلال إدخال التحسينات في الصناعات التحويلية القائمة على تكنولوجيا النانو.
  - تخفيض مســتويات تركيز الغازات الملوثة للجو، من خلال الاســتفادة الفعلية من الطاقة الشمسية عن طريق تطبيق الخلايا الفوتوفولطية.

- **مجال الطب والرعاية الصحية**
  - زيــادة كفاءة ومصداقية التشــخيص الطبي والكشــف المبكر عن الأورام والأمراض.
  - تحسين فاعلية الدواء والعقاقير الطبية.
  - مكافحة السرطان والأوبئة والأمراض المستوطنة.
  - تطوير وزيادة كفاءة العمليات الجراحية.

- **مياه الشرب**
  - توفيــر مصادر آمنه لمياه الشــرب، عن طريق معالجــة وتحلية المياه المالحة بواسطة تقنيات النانو.
  - رفــع كفاءة تقنيــات تدوير المياه، والحصول علــى ماء نظيف صالح للاستخدام الآدمي.

- **موارد الغذاء**
  - رفــع كفاءة التربة الزراعية، واســتصلاح الأراضي الصحراوية، عن طريق استخدام المخصبات النانوية.

- التحكم في ملوحة التربة، ومعالجة الملوثات البيئية الموجودة بها.
- رفع القيمة الغذائية لمنتجات الأطعمة، وإضافة التحسينات.

هل للنانو وجه آخر؟

نظرا إلى أن تقنيات تكنولوجيا النانو تقوم في الأساس على التلاعب بــذرات وجزيئات المادة، فقد أثار ذلــك حفيظة الكثيرين، الذين قد رأوا أن التاريخ يعود أدراجه مرة أخرى إلى الوراء، حين بزغ فجر التكنولوجيا الحيوية. وقد زادت الأمور صعوبة، في خلال السنوات الخمس الأخيرة، حين تعانقت تقنيــات تكنولوجيا النانو مع تقنيــات التكنولوجيا الحيوية تحــت مظلــة «تكنولوجيا النانــو الحيوية». فقد كان لهــذا التداخل بين التكنولوجيتــين آثار ســلبية لدى البعــض، لذا فقد رأوا الاســتفادة من الــدروس الماضية الخاصة بالتكنولوجيا الحيويــة، خاصة أن تكنولوجيا النانو تمتلك تقنيات متعددة، أوســع بكثير من تلك التقنيات التي تمتلكها التكنولوجيا الحيوية. وهذا يعني - بالنســبة إليهم - زيادة اتســاع رقعة الخطــورة الأخلاقية المرتبطة بتكنولوجيــا النانو، مما يفرض دق ناقوس الخطر، وحتمية التدخل السريع.

ولا شــك في أن لكل تكنولوجيا جديدة وجهين: وجها «ناصعا» يتمثل فــي مجموعة الفوائد والمكاســب التي يمكن أن تعــود علينا من جراء تطبيقاتهــا، ووجها «معتما» يمثل مجموعة من التحديات والمخاطر التي قد تحدث عند التطبيق الفعلي لها. ولعل تكنولوجيا إنتاج الوقود النووي واســتخدامات الطاقة النووية الســلمية، خير مثال يمكن اســتخدامه للدلالة على ذلك.

وبالطبع ليس من المنطقي تطبيق القوانين نفسها والأطر المُلزمة الخاصة بالتقنيات والتكنولوجيات الماضية، ونقلها جملة وتفصيلا إلى التكنولوجيات اللاحقة، فلكل تكنولوجيا هويتها، وطبيعتها ومخاطرها الخاصة بها.

وقــد تبنت منظمة الأمم المتحدة للتربية والعلوم والثقافة (اليونســكو UNESCO United Nations Educational ،Scientific and Cultural Organization) مــن خــلال لجنــة منبثقة عنهــا، تضــم 36 خبيرا من

جميع التخصصات - أتشــرف بالمشــاركة في أعمالها - أطلق عليها اسم الكومســت «اللجنة العالمية لأخلاقيات المعارف العلمية والتكنولوجية The World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology, (COMEST) عقد سلسلة من اللقاءات الدولية، في مناطق وأقاليــم مختلفة من العالم، كان آخرها في دولــة قطر من العام الماضي، وذلك لمناقشة أبعاد المخاطر والقضايا الأخلاقية المحتمل حدوثها من جراء التطبيقات التكنولوجية للمواد النانوية، وكيفية التصدى لآثارها، من خلال أُطُر وقوانين ملزمة.

وقد تميزت أعمال هذه اللجنة بالحيادية، والموضوعية والشــفافية، المتمثلة في تسمية تلك المخاطر وتحديدها، مع مناقشة أبعادها وآثارها فــي المجتمع. وقد عقدت جلســات على هامش الــدورة العادية الثالثة لاجتماعات «الكومســت» التي انعقدت في ديســمبر مــن العام 2003، في مدينة «ريــو دي جانيرو» بالبرازيل، وكذلك خلال اجتماعات الدورة العادية الرابعة للجنة نفســها، التي انعقدت في مارس من العام 2005 فــي مدينة «بانكوك» في تايلاند، لمناقشــة ضرورة تشــكيل فريق عمل خاص ينبثق عن اللجنة، وتُخول له صلاحية مناقشة أبعاد الآثار السلبية والمخاطر المُتعلقة بتطبيقات تكنولوجيــا النانو، مع تكليفه بمهمة إعداد «مسودة وثيقة توجيهية»، تُعد الإطار العام الملزم للدول الأعضاء بمنظمة الأمم المتحدة. وعقدت اللجنة بعد ذلك دورة استثنائية في مدينة باريس بفرنسا، خلال شــهر يونيو من العام 2006 وذلك لمناقشة تلك الوثيقة، حيث صيغت على الشــكل النهائي، بإضافة بعــض التعديلات وإضافة توصيات إليها.

• مخاطر النانو بين الهاجس والحقيقة

صاحبت مواد وتكنولوجيا النانو منذ منتصف العقد الأول من هذا القرن مجموعة من الهواجس، تتعلق بالمخاطر المُحتملة والآثار السلبية المترتبة على تطبيقاتهــا في المجالات المختلفة. ولعل من أبرز تلك المخاطر التي يمكن أن توصم بها مواد وتطبيقات تكنولوجيا النانو تلك المتعلقة بالقضايا التالية:

- قضايا أخلاقية.
- قضايا اجتماعية.
- قضايا اقتصادية.
- قضايا بيئية.
- قضايا متعلقة بسُمية Toxicology المواد النانوية.

ويــزداد الموقف تعقيدا وغموضا، نظرا إلى ما تتســم به المواد النانوية وتكنولوجيتهــا بخواص تنفــرد بها، الأمر الذي يثيــر مجموعة أخرى من الهواجس لدى كثيرين، والتي من بينها:

- هواجس متعلقة بالطبيعة غير المرئيــة للمواد النانوية المُخلّقة معمليا، وعدم القدرة على متابعتها في أثناء التشغيل بالعين المُجردة. وهذا يثير احتمال فشل أي محاولة للسيطرة عليها وإبطال فاعليتها إذا ما احتاج الأمر إلى ذلك. وقد رأى البعض أن يربط بينها وبين طبيعة التفاعلات التسلسلية الانشطارية بالمفاعلات النووية، التي يصعب إيقافها، إلا من خلال استخدام تقنيات خاصة.
- ارتفــاع المعدلات الإنتاجية للمواد النانوية، وظهور عائلات جديدة منها بصورة شــبه يومية. وهذا يمثل عند البعض خطورة نابعة من هاجس عدم ضمان أهلية تلك المواد الناشئة للاستخدمات الآمنة.
- هواجــس تتعلق بهذا التعتيم الكامل الذي تفرضة الدول المُنتجة للمواد النانوية التي تُســتخدم في الأغراض والتطبيقات العسكرية، وصناعة أسلحة الدمار الشامل.
- هواجس أمنية تولدت عند حكومات الدول التي لم تشــارك بعد في وضع خطط وبرامج بحثية وتطبيقية لتكنولوجيا النانو. ولتلك الدول كل الحق في أن تشــعر بهذا القلق، خاصة وهي تشــعر بالندم على عدم مشــاركتها في النشــاط النووي العالمي في مهده، في منتصف القرن الماضي.
- هواجــس تتعلق بالمســتقبل العلمي والاقتصادي الــذي تنتظره الدول المتخلفة عن ركــب تقنيات النانو التكنولوجية، وزيــادة احتمال تعميق الفجوة التكنولوجية بينها وبين رواد سفينة تكنولوجيا النانو وبحاريها.

تكنولوجيا النانو والعالم النامي

أدت النتائج الواعدة والمشجعة لتطبيقات تكنولوجيا النانو في المجالات الحياتية التي تمس القضايا المتعلقة بالبيئة، الغذاء، الدواء، والطب والرعاية الصحية إلى أن يضعها البرنامج الإنمائي للألفية الثالثة التابع لهيئة الأمم المتحـدة United Nations Millennium Development Goals MDGs فـي تقريره للعـام 2005 كتقنية أولى ومعول أساسـي لتحقيق الأهداف الإنمائيـة للألفية الثالثة الخاصة بالتنميـة والتعمير والتخفيف من حدة المشـاكل الناجمة عن الفقر والمرض، ولم يقتصر «المد النانوي» على الدول المتقدمـة تكنولوجيا فقط، بل امتد ليصل إلى العالم كله، من غني وفقير، وبدأت تلك التكنولوجيا الواعدة تنال كثيرا من الاهتمام من قبل عديد من دول العالم النامي، مثل الصين، كوريا الجنوبية، الهند، إسرائيل، البرازيل، الأرجنتـين، إيران، تركيا، تايوان، جنوب أفريقيا، سـنغافورة، المكسـيك، إندونيسيا، ماليزيا، وعدد آخر تجاوز الثلاثين دولة. ومن الجدير بالإشارة، أن الصناعـات القائمة على الثورات التكنولوجية التي سـبقت ثورة النانو مثل صناعة الحديد والصلب، الصناعات المرتبطة بقطاع السكك الحديد، الغزل والنسـيج، صناعة السـيارات، صناعة الأجهزة والمعدات الكهربية والإلكترونيـة، تحتاج دائما إلـى بنية تحتية صلبة هائلـة، وتوافر رؤوس أمـوال ضخمة تعجز دولنـا النامية عن توفيرها. هـذا بالإضافة إلى أن تلـك الصناعات قـد احتكرت بالفعل من قبل الـدول الصناعية الكبرى، أو مـن بعض الـدول النامية التي في طريقها للتحـول إلى مصاف الدول العظمى، مما يُصعّب من مهمة الدول الناشـئة في المنافسـة وإيجاد سوق عالمي لتسويق منتجاتها.

وقد وجـدت دولنا النامية في هذه التكنولوجيا، السـبيل من أجل حل كثير من مشاكلها المتعلقة بمجالات الصحة، البيئة، المياه والطاقة، تلك المشاكل التي عجزت عن إيجاد حلول لها المواد والطرق التقليدية. ومن المؤكد آن تؤدي تطبيقات النانو إلى المسـاهمة الفعالة في القضاء على ظاهـرة البطالة بين الخريجين الجـدد، وتوفير فرص عمل في المشروعات البحثية والإنتاجية القائمة على تطبيقاتها المتقدمة.

هــذا، وتتفوق تكنولوجيا النانــو في كونها التكنولوجيــا الوحيدة ذات الوظائــف والاســتخدامات المتعددة، حيث يمكن توظيــف منتج واحد من منتجاتهــا النانوية في أكثر من مجال تطبيقي. وبطبيعة الحال، يؤدي هذا إلــى تخفيض تكلفة الإنتاج. لذا، فمن المرجح أن تضاعف تكنولوجيا النانو مــن القدرة الإنتاجية في البلدان النامية، وذلك من خلال تقديمها ســبلا جديــدة لعمليات تصنيعيــة مُبتكرة ورخيصة، ممــا يضمن الحصول على منتجات تكنولوجية عالية القيمة، منخفضة السعر، تُستخدم في تطبيقات متنوعة، لا يتخلف عنها إلا قدر هامشــي من الملوثــات البيئية التي يمكن السيطرة عليها ومعالجتها.

• تكنولوجيا النانو في الدول العربية والشرق أوسطية

علــى الرغم مما يُظهره الشــكل (14 - 2) من غيــاب لدولنا العربية عن ســاحة النشــر العلمي المُكثف الخــاص بعلم وتكنولوجيــا النانو، فإن هــذا لا يعني غياب الأنشــطة العلمية والبحثية المُتعلقــة بهذا المجال عن منطقتنا العربية. وكما ذكرنا ســلفا، فإنه وللمرة الأولى، منذ دخول العالم فــي ثوراته الصناعية الكبــرى في أوائل القرن الثامن عشــر، أن تتواكب الاهتمامات التقنية والأنشطة العلمية والبحثية لكثير من الدول العربية مع تلــك الاهتمامات والمجالات التي توليها الدول الصناعية المتقدمة اهتماما كبيــرا. فقد بــادرت بعض من دولنــا العربية في منطقــة الخليج العربي (الســعودية، الكويت، قطر)، والنطاق العربي بالشــمال الأفريقي (مصر) خلال سنوات العقد الأول من القرن الحادي والعشرين في تأسيس برامج ومراكز تميز لعلم وتكنولوجيا النانو. وقد انضمت حديثا إلى هذا النشاط البحثي العربي في المجال نفســه، دول عربية شقيقة أخرى، مثل الجزائر، المغرب، تونس، الإمارات، الأردن، وفلســطين. وإن دل هذا على شيء، فإنه يدل على تعاظم الحس العربي بأهمية دور التكنولوجيات المتقدمة في دعم وتعزيز الاقتصاد العربي، وتوظيف أدوات تكنولوجيا النانو لحل مشــاكلنا المســتعصية، وتحســين معيشــة المواطن العربي وتوفير الرعاية الصحية والخدمات الطبية له.

وبالطبع، لا نستطيع القول إننا قد حققنا كل ما نريده ونطمح إليه كعلماء وباحثين في هذا المجال البحثي المهم، فالطريق ما زال أمامنا طويلا وشاقا، والمنافسة العالمية على أشدها. وقد وحدت تكنولوجيا النانو بين الاهتمامات البحثية في الدول الغنية والفقيرة، المُتقدم منها والنامي، وفي الوقت ذاته، فهي قد أشعلت حلبة المنافسة العلمية الشريفة، وعززت معاني الاستثمار القائم على العلم والمعرفة، كما أنها أبرزت أهمية الملكية الفكرية وبراءات الاختراع، وحق الفرد في أن يحتكر نتاج أنشطته الإبداعية، وأن يجني ثمرات كفاحه ومثابرته في تحصيل وإنتاج العلم. والأمة العربية بعلمائها وشبابها الواعد، قادرة على مواجهة هذا التحدي، والمضي في تحسين أوضاعها بالقدر الذي يتناسب مع تاريخها العريق.

وقد يتفق القارئ الكريم معي في الرأي، بشأن أهمية معرفة ما يدور من أنشطة بحثية متعلقة بعلم وتكنولوجيا النانو، في بعض الدول المتاخمة لنا في منطقة الشرق الأوسط، مثل إيران وتركيا وإسرائيل، ومقارنة أنشطتها البحثية في هذا المضمار مع الأنشطة البحثية الجارية في منطقتنا العربية. وسوف تعتمد هذه المُقارنة على حصيلة النتاج العلمي، المتمثل في نشر الأوراق البحثية المتعلقة بالنانو في الدوريات العلمية العالمية منذ سنة 2000 وحتى نهاية العام 2008، مع إسقاط تلك الأوراق المنشورة في ورشات العمل والندوات، أو في المجلات العلمية المحلية، من الحسبان.

- **قضايا النشر والمنافسة العلمية**

يوضح الجدول (14 - 2) مقارنة بين عدد الأبحاث المنشورة بالدوريات العالمية في مجال علم وتكنولوجيا النانو، التي شاركت بها الدول العربية، وبعض من الدول النامية الأخرى الواقعة في منطقة الشرق الأوسط أو في قارة آسيا، وذلك خلال الفترة ما بين العامين 2000 و 2008.

الجدول (14 - 2): مؤشر التميز العلمي في مجال تكنولوجيا النانو المعتمد على كثافة نشر الأوراق البحثية بالدوريات العلمية العالمية للدول العربية، مقارنة ببعض من الدول الشرق أوسطية والنامية في قارة آسيا. (بيانات مُستقاة من المراجع 5 - 7).

الدولة	عدد الأبحاث المنشورة	نسبة المساهمة العالمية (%)	المقارنة بإيران	المقارنة بتركيا	المقارنة بإسرائيل
أولا. الدول العربية					
مصر	589	0.300	0.43	0.58	0.18
الجزائر	182	0.090	0.13	0.18	0.05
تونس	171	0.088	0.12	0.17	0.05
المغرب	122	0.060	0.09	0.12	0.04
السعودية	98	0.050	0.07	0.10	0.03
الأردن	69	0.040	0.06	0.07	0.02
دول عربية أخرى(*)	32	0.02	0.02	0.03	0.01
المجموع	1263	0.650	0.92	1.25	0.38
ثانيا: بعض الدول الشرق أوسطية					
إيران	1385	0.76			
تركيا	1017	0.53			
إسرائيل	3363	1.74			
المجموع	5765	2.98			
ثانيا: بعض الدول النامية بقارة آسيا					
الصين	34825	18.00			
النمور	23217	12.00			
الهند	7720	4.00			
المجموع	65762	34.00			

(*) *الكويت، الإمارات، العراق، سورية، قطر، البحرين، ولبنان.*

وبفحص البيانات المدونة بالجدول السابق تتضح لنا عدة أمور مهمة، هي:

- تدني مؤشر النشر العلمي بالدول العربية - 13 دولة - في مجال تكنولوجيا النانو، حيث بلغت مساهمتها في الإنتاج البحثي العالمي نحو 0.65 في المائة.

- الإنتاج العلمي العربي المنشـــور عالميا في هذا المجال خلال فترة ثمانية أعوام (1263 ورقة)، لا يعادل ما نشـــرته إيران من أوراق علمية خلال الفترة نفســـها (1385 ورقة). هـــذا بينما يتدنى إلـــى نحو ثلث عدد الأوراق التي نشرتها إسرائيل خلال الفترة نفسها (3363 ورقة).
- على الرغم من الحصار الشامل المفروض على إيران منذ عقود عدة، فإنها تحتل الترتيب الثاني بعد إســـرائيل في ما يتعلق بمسألة النشر العلمي الخاص بدول منطقة الشـــرق الأوســـط المهتمـــة بتكنولوجيا النانـــو. وهي في ذلك، تتفوق على تركيـــا المتاخمة لقارة أوروبا، وما لهـــذا الجوار من مزايا تتعلق بالتعـــاون العلمي والتكنولوجي مع دول هذه القارة المتقدمة.
- ارتفاع مؤشـــر النشـــر العلمي في مجال تكنولوجيـــا النانو في الدول الصاعدة من قارة آســـيا، إلـــى الحد الذي شـــاركت فيه بعض منها بنحو ثلث المنشور من أبحاث نانوية على مستوى العالم، خلال الفترة موضع المقارنة.

وأود التأكيـــد هنـــا، أنه لم يكـــن الهدف مُطلقا مـــن وراء عرض تلك البيانات هو تثبيط الهمم أو قطع الطريق أمام جهودنا البحثية في مجال تكنولوجيـــا النانو، التي تزداد يوما بعد يوم فـــي منطقتنا العربية، لكنني قصـــدت بهذا العـــرض أن أؤكد ضرورة مواصلة مســـيرتنا البحثية، وأن نضاعف جهودنا العلمية والإنتاجية، لا ســـيما أن لدينا الآن في منطقتنا العربية علماء وباحثين متخصصين في هذا المجال التكنولوجي الحيوي. وبالإضافة إلـــى هذا، فإن تلك الجهود الراهنة التـــي تقوم بها حكومات البلـــدان العربية، والمتمثلة في إرســـال طلابها لنيل درجات الماجســـتير والدكتـــوراه في مجال علم وتكنولوجيـــا النانو، بالإضافة إلى تخصيصها ميزانيات جيدة موجهة إلى تعزيز مراكز وبرامج التميز النانوية، ســـوف تؤتي ثمارها خلال الســـنوات الخمس المقبلة على الأكثر. ومن المؤكد أنه ســـوف يزداد ضخ هذه الأموال ويزداد عـــدد المبعوثين، مع زيادة جهودنا البحثية وارتفاع حصيلة إنتاج المخرجـــات الابتكارية والإبداعية لعلمائنا في هذا المجال التكنولوجي المهم.

• اتساع فجوة المعرفة

تمثل اتساع الفجوة المعرفية في علم وتقنيات تكنولوجيا النانو، بين دول الشمال المتقدمة ودول الجنوب النامية، أحد أخطر الآثار السلبية المترتبة على تطبيقات تكنولوجيا النانو والتقدم البحثي في مجالاتها، وهو ما حذرت منه «الكومست». فعلى الرغم مما يبينه الجدول (14 - 2) من مشاركة بحثية جيدة تمارسها الدول النامية، فإن أغلبية المخرجات البحثية الخاصة بدولنا النامية في هذا المجال ما زالت دون المستوى العالمي، حيث تعاني أغلبيتها إما من عدم التحديث والسير على وتيرة واحدة، أو محاكاة أبحاث الغير التي أُجريت منذ فترة بعيدة. ويمكننا هنا أن نوجز المعوقات التي تواجهها مسيرة البحث العلمي في علم وتكنولوجيا النانو في الدول النامية عامة وفي المنطقة العربية على وجه الخصوص - يلاحظ أنها تتحد مع المعوقات البحثية نفسها التي تواجهها أفرع العلوم الأخرى - في عدة نقاط:

- ضعف مستوى التمويل الحكومي الموجه لتعزيز شراء أجهزة تحضير وتوصيف المواد النانوية (قلت حدة تأثير هذا العامل في بعض من بلدان العالم العربي بعد أن ضخت حكومات تلك البلدان ميزانيات جيدة تستخدم في تأسيس مراكز تميز لتكنولوجيا النانو، لكن ما زالت المشكلة متفاقمة في كثير من البلدان العربية والبلدان النامية).

- غياب دور الشركات وقطاع الأعمال الخاص عن تمويل البحوث العلمية الخاصة بتكنولوجيا النانو، وعدم الاستفادة من المخرجات البحثية للعلماء الوطنيين.

- عدم توافر العلماء والباحثين المتخصصين في علم وتكنولوجيا النانو، ودخول فئة غير متخصصة إلى هذا المجال، من باب «الوجاهة الأكاديمية» أو لربما من أجل مسايرة «التقاليع والموضة» لما هو جديد.

- التشكيك في ما يمكن أن تؤدي تكنولوجيا النانو في دعم وتعزيز الاقتصاد الوطني.

- عدم اكتراث أفراد المجتمع المدني بما يجري من بحوث علمية داخل مؤسساته البحثية الوطنية.

- غياب ثقافة العمل بروح الفريق الواحد.
- غياب ثقافة الإبداع والاختراع عن الباحثين.
- هجرة العقول إلى دول العالم المتقدم في الأنشطة البحثية المتعلقة بتكنولوجيا النانو وتطبيقاتها.
- عدم إدراج علم وتكنولوجيا النانو ضمن المناهج التي تُدرس في مراحل التعليم الأساسية.
- انتكاب مجتمع البحث العلمي في الدول النامية بأنصاف المثقفين من خارج التخصص الدقيق.

وتكمن آليات التغلب على تلك العقبات في ثلاثة حلول هي:

- توجيه العلماء والباحثين العاملين في مجال علم وتكنولوجيا النانو إلى تركيز جهودهم البحثية ونتاج نشاطهم العلمي في إيجاد حلول علمية، تتميز بالابتكار والإبداع، لما تواجهه دولهم من مشاكل، فشلت التكنولوجيات السابقة في وضع حلول عملية لها.
- قيام الباحثين في تلك الدول بجذب قطاع الأعمال الخاص للشراكة في تمويل المشاريع البحثية الجادة ذات المردود الاقتصادي والعلمي الجيد.
- التعاون الدولي مع دول الشمال المتقدمة، أو الجنوب الصاعدة في تنفيذ مشاريع بحثية تهم البلدين. وتعد هذه المشاركة الدولية إحدى أهم الآليات الخاصة في التغلب على تدني مستوى التجهيزات المعملية، وانخفاض الدعم الحكومي الموجه لتمويل مشاريع تكنولوجيا النانو، التي غالبا ما تتسم بارتفاعها.

• التغيرات الاجتماعية المصاحبة

لقد تغيرت مفاهيم المجتمع المدني ونظرته إلى العلوم والتكنولوجيا تغيرا جذريا منذ منتصف القرن العشرين، فأصبحت العلاقة بين الثالوث: العلم والتكنولوجيا والمجتمع، علاقة وطيدة ومهمة تمثل في جوهرها ترابطا وتكافلا مهما بحيث لا يمكن عزل أحدهم عن الآخر. وقد أضحت التطبيقات الخاصة بالعلوم المعرفية والتطورات التكنولوجية المصاحبة

العوامل الرئيسية في تقييم مدى ازدهار أي مجتمع وتعيين مقدار تقدمه ونموه. هذا ما دلت عليه دروس الماضي من التغييرات الاجتماعية المعقبة للثورات الحضارية والصناعية بدءا من عصر ما قبل الصناعة مرورا بالثورات الصناعية الكبرى التي شهدتها البشرية خلال القرون الثلاثة الماضية والتي توجت بثورة الهندسة الوراثية والتكنولوجيا الحيوية، وكذلك ثورة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات التي ما زلنا نعيش نتائجهما وتأثيرهما في الحياة الاجتماعية حتى اليوم.

وتُعد ديناميكية التغييرات الاجتماعية المصاحبة للعلوم والتكنولوجيا في مجتمعات البلدان النامية، وعلى الأخص في دولنا العربية والعالم الإسلامي عملية معقدة وذلك لارتباطها بنسيج وثقافة المجتمع وبالنظم الاجتماعية والعادات والتقاليد الموروثة. ولا يقتصر طول الفترة الزمنية المرتبطة باستجابة المجتمع للثورات التكنولوجية على مجتمعاتنا فقط، بل إنها تشمل مجتمعات العالم كله، ولكن بنسب متفاوتة. فإذا ما نظرنا إلى الفترات الزمنية المطلوبة في مجتمعات العالم الغربي لإحداث تغييرات تكنولوجية واجتماعية مبنية على الاختراعات والاكتشافات، فسنجد أنها قد تطلبت مددا زمنية طويلة، وذلك نظرا إلى حاجة أي نظام اجتماعي، شرقي أو غربي، نام أو متقدم، إلى الوقت الكافي للرد لتعديل الأنماط الاجتماعية المصاحبة للثورات العلمية، ومحاولة إيجاد توازنات جديدة في نسيجه وهيكله الداخلي تقوم أساسا على ضبط إيقاع العلاقات الاجتماعية المواكبة للثورات التكنولوجية والاكتشافات العلمية.

وبطبيعة الحال فإن هذه التغييرات الاجتماعية سوف تتكرر، وإن كانت بصورة أعمق وبشكل شمولي عندما تهيمن تكنولوجيا النانو (تكنولوجيا التصنيع الأولى في القرن الحادي والعشرين) على مجريات الأمور في القطاعات الصناعية والاقتصادية في العالم أجمع. ونود التأكيد أنه ليس بالضرورة أن تتم هذه التغييرات المصاحبة لتطبيقات تكنولوجيا النانو على النمط نفسه الذي تمت به عقب الثورات الصناعية السابقة، وذلك نظرا إلى تمتع هذه التكنولوجيا بقدر كبير من المرونة التي تؤهلها لإحداث تغييرات تدريجية في طرق الصناعة المستخدمة عن طريق إدخال تعديلات مطردة

ومتلاحقة مما يُعطي مجتمعات العالم الفرصة للاستيعاب التكنولوجي. وقد يشاركني القارئ الكريم الرأي بأن الخطورة تكمن في تخلف بعض الدول عن مواكبة هذه التكنولوجيا الحديثة، والارتضاء بما هي عليه اليوم وعدم الرغبة في تطوير منتجاتها المحلية، مما يجعلها صيدا سهلا وسوقا مفتوحة لفيضان السلع النانوية القادمة إليها من جميع أرجاء العالم.

● القضايا الأخلاقية المتعلقة بتكنولوجيا النانو

كما ذكرنا من قبل، أثارت القدرات التقنية التي تتمتع بها تكنولوجيا النانو، الخاصة بالهيمنة على المادة من خلال التلاعب بذراتها وجزيئاتها وإعادة ترتيبها بشكل جديد، أثارت حفيظة حكومات الدول، ورجال الدين وأفراد المجتمع المدني. خاصة، أن العالم لم يفق بعد من واقعة ما حدث في مؤتمر «أسيلومار» في العام 1975 حين أعلن أحد العلماء توصله إلى طريقة تمكنه من التلاعب بجينات الحمض النووي للنبات والحيوان، ونقلها من فصيلة إلى فصيلة أخرى بهدف تخليق كائنات جديدة تتمتع بتركية جينية متميزة. وقد أثار إعلان هذه النتائج المعملية جدلا كبيرا، وانتقادات عنيفة، مما دعا حكومات الدول المعنية إلى وضع ضوابط لما يجريه الباحثون داخل المعامل. وقد انطبعت تلك الواقعة في أذهان المجتمع المدني بجميع طوائفه وخلفياته العلمية والثقافية، لذا فهم ينظرون إلى تكنولوجيا النانو بعين الحذر، خشية تكرار الكارثة نفسها على نطاق أوسع، وحدوث فوضى في التركيبات الجينية للكائنات والخلط بينها، مما قد ينجم عنه تولد كائنات جديدة لم تكن معروفة من قبل، تصعب الهيمنة عليها وترويضها، مما يعرض الحياة على الكرة الأرضية للدمار والفناء.

وفي إطار ما تقوم به حكومات الدول من توجيه الباحثين والضغط عليهم تارة، أو إغرائهم بميزانيات ضخمة لدعم أنشطتهم البحثية، انصب تركيز علماء النانو والتكنولوجيا الحيوية على الأنشطة والمشاريع البحثية الموجهة نحو إنتاج العقاقير الطبية الجديدة، وأجهزة الروبوت نانوية الأحجام، وإيجاد سبل ووسائل فعالة للكشف المبكر عن الأورام

والأمراض، وذلك من أجل دحر السرطان ومكافحة ودحر فيروس مرض الإيدز، وذلك بدلا من ممارسة المغامرات المعملية بجينات الكائنات الحية، غير المضمونة العواقب.

وهناك هاجس آخر يشــغل الحكومات وهو ما يتعلق بقضايا الإرهاب وإمكان استخدام المجموعات الإرهابية للمعلومات ونتائج البحوث المنشورة، الخاصــة بتخليق المواد النانوية وكيفية توظيفها في تصنيع جيل جديد من المواد الكيميائية والأسلحة الفتاكة الأخرى.

فــي الواقع هناك قضايــا كثيرة، وهواجس مختلفــة ومتعددة، بعضها حقيقي وأكثرها مبالغ فيه. وعلى المستوى الشخصي، وبكل تواضع، فإني أرى أن الخطر الحقيقي الذي يمكن أن نتأثر به كدول نامية من جراء تطبيقات تكنولوجيا النانو، هو التخلف عن ركبها، كما حدث سابقا في التكنولوجيات الأخرى التي تخلفنا عن اللحاق بها. وأرى أن الخطر الحقيقي الذي سوف تواجهه الشــعوب الفقيرة والنامية، هو خطر اقتصــادي في المقام الأول. إن التزايد المطرد في حجــم المبيعات والمنتجات النانوية، لأمر مقلق نظرا إلى أن تلك المنتجات الاســتهلاكية تجد سوقا ضخمة لها في مجتماعاتنا العربية، وهذا يعني اســتنزاف المال العربي وإهداره. وأخشــى من مجيء ذلك اليوم القريب، الذي تتحول فيه العقاقير والأدوية الفعالة إلى منتجات نانوية، لا يســتطيع شراءها إلا كل قادر، وبذلك تترسخ في العالم مفاهيم غير أخلاقية، فيصبح العلاج من الأمراض الفتاكة والمزمنة حقا للغني، أما المرضى من الفقراء فعليهم التحلي بالصبر وتعاطي العقاقير التقليدية!



الهوامش

هوامش الفصل الأول

(1) ربمـــا تكون هذه الكلمة هي أصل كلمة «نَنووس» المســتخدمة في مصر لتصغير الأشياء بغرض تدليل الطفل الصغير أو أحيانا للسخرية وتقليل شـــأن شـــخص ما. وربما تكون قد وردت في اللغـــة الفرعونية القديمة نتيجـــة للانفتاح القائم بين الحضارتين القديمتـــين المصرية والإغريقية آنذاك وتوارثها المصريون بعد ذلك لتدخل في قاموس اللغة العامية.

(2) السنتيمتر cm = 100/1 (جزء من مائة من المتر).
المليمتر mm = 1000/1 (جزء من ألف من المتر).
الميكرومتر μm = 100000/1 (جزء من مليون من المتر).
النانومتر nm=1000000000/1 (جزء من مليار من المتر).

(3) تعـــد ذرة عنصر الهيدروجين أصغـــر ذرات العناصر المعروفة حيث يبلغ مقيـــاس قطرها نحو 0.075 نانومتر ويتم تقريب هذه القيمة في معظم المراجع إلى0.1 نانومتر.

(4) تم تنفيذ الشكل بواسطة المؤلف.

(5) M. Sherif El-Eskandarany, J. Saida, and A. Inoue, Acta mater. Vol. 51 (2003) pp. 1481-1492.

(6) يتفق معنا في هذا الرأي الأســـتاذ الدكتور فؤاد زكريا في كتابه «التفكير العلمي» الصادر عن عالم المعرفة، العدد الرقم 3 العام 1978 الصفحات 131، 132. كمـــا يتوافق الدكتور أنطونيوس كـــرم معنا وذلك في كتابه الصـــادر تحت عنوان «العرب أمام تحديات التكنولوجيا»، سلســـلة عالم المعرفة، العدد 59، العام 1982، الصفحات 11 ، 25.

(7) أســـتاذ دكتور محمد شريف الإسكندراني: تكنولوجيا النانو، نصف قرن بين الحلـــم والحقيقة. مجلة العربي - وزارة الإعـــلام في دولة الكويت، العدد الرقم 607، يونيو 2009، الصفحات 152- 159.

(8) أستاذ دكتور محمد شريف الإســـكندراني: التقانة النانوية لدفع قاطرة التنمية. مجلة التقدم العلمي - مؤسســـة الكويـــت للتقدم العلمي، العدد 66، أكتوبر 2009، الصفحات 25 - 33.

(9) المرجع السابق.

(10) لقراءة نص المحاضرة الكامل، أقترح زيارة الموقع التالي:
http://www.aps.org/publications/apsnews/200012/history.cfm

(11) Binning, G, and H. Rohrer, Helvetica Physica Acta, Vol. 55 (1982) pp. 726-735.

(12) Eric Drexler, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 78 (1981) pp. 5275-5278.

(13) M. Sherif El-Eskandarany, Satoru Ishihara, Wei Zhang and A. Inoue, Met. Trans.36 A (2005) pp. 141-147.

(14) http://www.zurich.ibm.com/nano/themes_history.html

هوامش الفصل الثاني:

(1) علم المواد هو ذلك العلم الذي يعتني بدراسة خواص المواد واستنباط العلاقة بين تلك الخواص وبنية المادة وتركيبها وآثر العلميات الصناعية في تحسين تلك الخواص. وتنحدر جذور هذا العلم إلى العلوم الأساسية للفيزياء والكيمياء والرياضة.

(2) للقارئ المتخصص في تكنولوجيا النانو وكذلك القارئ المثقف المهتم بقراءة مزيد عن المادة من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية وميكانيكا نيوتن، المعروفة باسم الميكانيكا النيوتينيةNewtonian Mechanics ، أرشح مرجعا مهما ورشيقا جاء تحت عنوان «الفيزياء الكلاسيكية للمادة» ألفته نخبة متميزة من علماء الفيزياء وعلوم المواد من مختلف الجامعات البريطانية.

John Bolton and Others: Classical Physics of Matter, Institute of Physics Publishing, London, UK (2000). P 62-73.

(3) لا تفوتني فرصة دعوة القارئ المهتم بمعرفة أسماء كثير من الفلاسفة والعلماء الأوائل وإنجازاتهم العلمية التى أدت إلى اكتشافات كبيرة غيَّرت مسيرة البشرية خلال القرون الأربعة الماضية، إلى مطالعة كتاب مهم وشائق، تأليف العالم الأمريكى البروفيسور «توماس كون» والذى ترجمه الأستاذ شوقي جلال:

«بنية الثورة العلمية» عالم المعرفة، تأليف «توماس كون» وترجمة شوقي جلال. العدد رقم 168 العام 1992، الصفحات من 261 إلى 288، الناشر المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب - دولة الكويت.

(4) نال «طومســون» جائزة نوبل في الفيزياء العام 1906 عن مجمل أبحاثه الرائــدة في مجال الذرة. وتتأكد عبقريته وقوة مدرســته العلمية ومدى ثرائهــا وخصوبتها حين نبت من تربتها العالم الشــهير «راذرفورد» الذي يُعد أحد تلاميذ طومسون. وقد نال راذرفورد أيضا الجائزة نفسها ولكن في العام 1908. للاطلاع على قائمة الفائزين بجائزة نوبل في المجالات المختلفــة منذ العــام 1901 وحتى العام 1906، يرجــى مراجعة الموقع الرسمي للجائزة وهو موجود على الشبكة العنكبوتية تحت عنوان:

http://nobelprizes.com/nobel

(5) مــن منــا لم يتنبه إلى وحــدة الخالق فيما أبدع وصنع من تشــابه كبير بــين نظام تركيب البنية الداخلية لأصغر ما في الوجود وهو الذرة، التي تجذب إليها جســيمات أدق منها بكثير لتســبح حولها في مدارات تلتف حول نواتها، وبين نظم أضخم النجوم في كوننا المادي هذا؟

(6) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(7) عالــم ألماني شــهير في علم الفيزيــاء حصل على جائــزة نوبل في الفيزيــاء العــام 1918، على يديه حُلت مشــكلة الصندوق الأســود حيث حســم الجدل العلمي الناشــئ إبان القرن التاســع عشر بشأن مصداقيــة الفيزياء الكلاســيكية فــي حل كل المشــكلات والظواهر الكونية والفيزيائية، وذلــك من خلال صياغته لنظرية جديدة عُرفت باســم ميكانيكا الكم التي تعد أســاس علم النانو. ولمعرفة مزيد عن هذا العالــم الكبير، يرجــى الاطلاع على الصفحــة الرقم 268 من المرجع الرقم 3 الســابق المُدون فــي هوامش هذا الفصل. أما القارئ المهتم بمعرفة أدق التفاصيل عن حياة وإنجازات «بلانك»، فأرشــح له الاطلاع على أحد المراجع التالية:

Max Planck, Scientific Autobiography and Other Papers. Philosophical Library, New York, 1949.

Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967.

(8) لســنا في حاجــة إلى التعريــف بعالم الفيزيــاء والرياضيات الفذ البروفيســور ألبرت آينشتاين، حاصد جائزة نوبل في الفيزياء العام 1921 وغيرهــا من الجوائــز العالمية، ولكني أود أن أشــير هنا إلى

كتاب رشيق كتبه آينشتاين بنفسه عن نظريته المعروفة باسم النظرية النســبية، حيث أوضح فيه كيف تلاحمت تلك النظرية مع ميكانيكا الكم التي أسســها ورســخها العالم الفيزيائي «ماكس بلانك» ليكونا معا حجر الزاوية الأول في صرح الفيزياء الحديثة. وعلى المســتوى الشــخصي فإني أعرف - شــأني في ذلك شأن الجميع - آينشتاين كعالــم فيزيائي ورياضي فذ، ولكن بعد قــراءة الكتاب التالي عرفت أيضا أنه فيلســوف وعالم اجتماع من العيــار الثقيل ! الكتاب يأتي بأسلوب مبسط ليستفيد منه كل من القارئ المثقف والمتخصص.

Albert Einstein, The World as I see it. A division of Lyle Stuart Inc, New Jersey, The U.S.A. (1949) .

(9) كتاب «فلسفة العلم في القرن العشرين» عالم المعرفة. تأليف الدكتورة يُمنى طريف الخولــي. العدد الرقم 264 العام 2000، الصفحات من 173 إلــى 203، الناشــر المجلس الوطني للثقافــة والفنون والآداب - دولة الكويت.

هوامش الفصل الثالث:

(1) G. Bums, Solid State Physics ,Academic Press ,San Diego ,1985.

(2) C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

(3) K. Boer, ed., Semiconductor Physics, Vols.1 and 2, Wiley, New York, 2001.

(4) قد يجد القارئ الكريم متسعا من الوقت يُمكنه من الاطلاع على تفاصيل النظم البلورية التي توجــد عليها المواد، وذلك من خلال تناوله أحد أو كلا المرجعين التاليين:

William D. Callister, Jr, Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, ISBN 0-471-39551, pp. 30-75.

M. Sherif El-Eskandarany, Materials Science: An Introduction, DAR AL-FIKR AL-ARABI, Cairo 1999, ISBN 977-19-9716-5, pp.35-62.

(5) ما لـم تحـدث أي متغيـرات خارجيـة أو ظروف تشـغيل ميكانيكي أو حــراري تفـوق قــدرة تلـك الـذرات فـــي المحافظـة علـى هذا الترتيب النموذجي.

(6) لولا هذا الاختلاف لما كان في قدرتنا أن نُفرق بين مادة وأخرى.

(7) M. Sherif El-Eskandarany, Journal of Nanoparticles, Vol. 2 (2009) 14-22.

(8) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(9) لمزيد من الاطلاع على سـلوك المواد الأمورفيـة في توزيع ذراتها توزيعا عشوائيا، قد يكون المرجع المبين أدناه مناسبا لهذا الغرض.

M. Sherif El-Eskandarany, J. Saida, and A. Inoue, Acta mater., Vol. 51 (2003) pp 4519-4532.

(10) M. Sherif El-Eskandarany, J. Saida, and A. Inoue, Acta mater. Vol. 51 (2003) pp. 1481-1492.

(11) من أرشيف النتائج البحثية لمؤلف هذا الكتاب التي لم تُنشر بعد.

(12) محمد شـريف الإسـكندراني: التقانة النانوية لدفـع قاطرة التنمية، مجلة التقدم العلمي - مؤسسة الكويت للتقدم العلمي، العدد 66، أكتوبر 2009، الصفحات 25- 33.

(13) M. Sherif. El-Eskandarany, J. of Alloys Comp. Vol. 391 (2005) pp. 228-235.

(14) Michael U. Niemann, et al,. Nanomaterials for Hydrogen Storage Applications: A Review. Journal of Nanomaterials. Vol. 10 (2008) Article ID 950967, pp. 1-9.

(15) Nam-Jung Kim et al., Current Applied Physics. Vol. 9 (2009) pp. 643-646.

هوامش الفصل الرابع

(1) للقـارئ المهتـم وكذلك المتخصص، قد يكون مـن المفيد الاطلاع على أحـد الكتب المعنية بالمواد من حيث الخواص والفئات، وهي كثيرة جدا ومنهـا ما هو مكتوب بالعربية أو بلغات أخرى. ولعل المرجع التالي يفي بهذا الغرض:

Raymond A. Higgins, The Properties of Engineering Materials. Edward Arnold Publishing, Inc, London, U.K. (2004), ISBN 0-340-60033-0. P. 230-382.

(2) يختلط الأمر عند كثير منا فى التفرقة بين «الفلز» و «المعدن»، للدرجة التـــي اعتقدنا فيها أن كلمـــة معدن تعني الحالة النقيـــة للعنصر، كأن نقول مثلا، معدن الألومنيوم النقى، كدلالة عن عنصر الألومنيوم النقي وســـبائكه المســـتخدمة في حياتنا المعاصرة. وهذا في الواقع خطأ نقع فيـــه جميعا، حتى كثير من الكتـــب والصحف لم تراع الدقة في اختيار المســـمى الصحيح، حيث تقع أيضا في نفس الخطأ الشـــائع. وأود هنا أن أقـــول إنه إذا ما قصدنا التعبير عـــن الحالة العنصرية النقية لخام مـــا وليكن خام الألومنيوم، بعد تخليصه من الشـــوائب والعوالق والمواد الأخرى الداخلة في تركيب مكوناته، فلا بد أن نســـميه فلز الألومنيوم، أما إذا كان الغرض من التسمية الإشارة إلى خام الألومنيوم الموجود في الطبيعة على هيئة أكســـيد الألومنيوم المحتوي على شوائب من أكاسيد أخـــرى مثل الحديد والتيتانيوم والســـيليكون، فلنا فـــي هذه الحالة أن نســـميه معدن أو خام الألومنيوم. لذا فإنـــه من غير المتصور أن نصف معـــدن الألومنيوم بالبريق أو بقدرته على التوصيل الكهربي والحراري، لأن ذلك مناف للحقيقية، وذلك لأن أكســـيد الألومنيوم رديء التوصيل، هـــذا على العكس من فلز الألومنيوم جيد التوصيل. ولســـت أدرى ماذا نفعل أمام المثل القائل «الناس معادن»! كما ترى عزيزي القارئ أن المثل هنا يصنف الناس إلى فلزات، فمنهم من يمتلك ســـمات مرتفعة وقيمة، ومنهم المتردي في السلوكيات والقيم الأخلاقية. أو لعل المثل هنا يقصد أن الناس معادن حيث يختلفون في نســـب الشوائب الداخلة في تكوين ســـماتهم وشـــخصياتهم. أعتقد أن هذا القصور في تحديد المســـمى الصحيح لا تقع مسؤوليته على اللغة العربية الثرية، ولكن تقع المسؤولية الأولـــى والأخيرة على من لم يراع الدقة فـــي التعبير والوصف الدقيق باستخدام كلمة عربية موجودة بالفعل في قاموس لغتنا الجميلة.

(3) M. Sherif El-Eskandarany: Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials. William Andrew Publishing, Inc, New York 13815, the U.S.A. (2001), ISBN 0- 8155-1462-x, p. 12.

(4) M. Sherif El-Eskandarany and others: Advances in Materials Research: Methods for the Production of Amorphous and Nanocrystalline Materials and Their Unique Properties, Spring Publishing, Swiss (2000) ISBN 3-540-67271-0, p. 76.

(5) M. Sherif El-Eskandarany, Journal of Nanoparticles, Vol. 2 (2009) 14-22.

(6) M. Sherif El-Eskandarany and A. Inoue, Physical Review B, Vol. 75 (2007) pp. 224109 - 1 to 224109-9.

(7) M. Sherif El-Eskandarany, Satoru Ishihara, Wei Zhang and A. Inoue, Met. Trans., Vol. 36 A (2005) pp. 141-147.

هوامش الفصل الخامس

(1) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(2) من آرشيف النتائج البحثية لمؤلف هذا الكتاب غير المنشورة.

(3) مـــن آجل عقد مقارنة صحيحة ودقيقة بـــين حبيبات العينتين، التُقطت الصور المجهرية بنفس قوة التكبير.

(4) M. Attarian Shandiza, et al. , Journal of Physics and Chemistry of Solids. Vol. 68 (2007) pp.1396-1399.

(5) تُعـــرف الصلادة في المواد بأنها الخاصية التـــي تتمتع بها المادة لمقاومة الخدوش الحادثة على سطحها جراء تعرض هذه الأسطح لأي إجهادات خارجية.

(6) يُقصد بمقاومة المادة مدى صمودها في مواجهة الإجهادات المختلفة التي تتعرض لها في أثناء التشـــغيل، ســـواء كانـــت هذه الإجهادات ســـاكنة أو ديناميكية متحركة ومتغيرة القيمة والاتجاه من دون وقوع انهيار بها.

(7) M. Sherif El-Eskandarany and A. Inoue, J. Mater. Res., Vol. 21 (2006) pp. 976-987.

(8) المتانـــة هي خاصية تُمكن المادة من اســـتيعاب الإجهادات الخارجية للأحمال الديناميكية الواقعة عليها، مثل إجهادات الصدم والطرق، من دون أن تنهار أو تظهر عليها أي تغيرات في أبعادها وأحجامها.

(9) يُقصــد بالقصافة عجز المادة عن اســتيعاب إجهادات الأحمال الديناميكية. التي تتعرض لها بشكل مباغت، من دون أن تنهار أو يحدث بهيكلها أي عيوب أو شــروخ نتيجة تعرضها لتلك الإجهادات. فمثلا، لا تُبدي فناجين القهوة أو الشاي أي استعداد لتقبل الصدمات الواقعة عليها جراء تعرضها للوقوع من ارتفاعــات عالية أو نتيجة الطرق عليها. ويؤثــر الترتيب الذري والروابطة الأيونية التى تربط بين ذرات أغلب المواد السيراميكية في تعزيز وتأصيل هذه الصفة التي تجعلها مواد غير قابلة للتشكيل عن طريق الطرق والسحب.

(10) قابلية المادة للتشكيل صفة تتمتع بها كل الفلزات وسبائكها مما يجعلها قابلة لأن تُسحب إلى أسلاك رفيعة، مثل أسلاك النحاس المستخدمة في التطبيقات الكهربية، أو شرائح ورقائق، مثل رقائق الألومنيوم المستخدمة في أغــراض إعداد الأطعمــة والأغراض الأخرى. وعلــى النقيض من الرابطة الأيونية في المواد السيراميكية، فإن الرابطة الفلزية التي تربط بــين ذرات الفلزات المُختلفة قد أضفت عليها القابلية للتشــكيل، وذلك نظرا إلى تواجد إلكترونــات هذه المواد الفلزية في صورة حرة غير تلك الصورة المُقيدة التي توجد عليها بالرابطة الأيونية.

(11) M. Sherif El-Eskandarany, J. of Alloys Comp., Vol. 296 (2000) pp. 175-182.

(12) M. Sherif El-Eskandarany, J. of Alloys Comp., Vol. 305 (2000) pp. 219-224.

(13) M. Sherif El-Eskandarany, Amir A. El-Mahdy, H.A. Ahmed and A.A. Amer, J. of Alloys Comp., Vol. 312 (2000) pp. 315-325.

هوامش الفصل السادس:

(1) يُطلق على هذه الطريقة أيضــا، طريقة الرش بالفتات الكاثودي، وذلك وفقا لترجمة مصطلــح Sputtering الواردة فــي معجم المُصطلحات العلمية والفنية والهندسية الجديد، إعداد الأستاذ أحمد شفيق الخطيب، إصدار العام 2008، الناشر «مكتبة لبنان ناشرون»، صفحة 764.

(2) وذلــك من أجل حماية المــواد الفلزية المراد إنتــاج حبيباتها أو طبقاتها النانوية من الأكسدة وتحولها إلى أكاسيد فلزية بدلا من الحصول عليها في صورة نقية.

(3) M. Sherif El-Eskandarany, K. Sumiyama, K. Aoki and K. Suzuki, Mater. Sci. Forum, Vol. 88 (1992) pp. 801-808.

(4) M. Sherif El-Eskandarany: Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials, William Andrew Publishing Inc, New York 13815, the U.S.A. (2001) pp. 1-2.

(5) C. Suryanarayana: Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker Publishing Inc, New York, the U.S.A. (2004) P. 45.

(6) تمتلــك طواحين الكرات القدرة علــى التعامل مع مختلف المواد الصلبة، ســواء كانت فلزية أو غير فلزية والوصــول بمقاييس حبيباتها الداخلية إلــى أبعاد نانوية لا تتجاور 5 نانومترات في أغلب الأحيان، وذلك إذا ما تم ضبــط العملية والهيمنة على جميــع العوامل المؤثرة في عملية فصل الحبيبات بعضها عن بعض وتصغير أبعادها، بصورة مُثلى.

(7) تعمل هذه الكرات على تكســير كتل الجسيمات الكبيرة، لذا فهي تُعرف باســم الوسط الطاحن Milling Media ويراعى في اختيار هذه الكور أن تكون بأبعاد مناســبة تتلاءم مع حجم أســطوانة الطحن، وألا تشغل حيزا حجميا يزيد على 40% من الحجم الداخلي للأسطوانة. كما يجب أن تكون تلك الكرات مُصنعة من مادة الأســطوانة نفســها، وذلك بهدف تقليل نســبة معدلات البــري الناجمة عن احتكاك الكرات مع الســطح الداخلي لإناء الطحن.

(8) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(9) M. Sherif El-Eskandarany, K. Aoki and K. Suzuki, J. Less-Common Met., Vol. 167 (1990) pp. 113-118.

(10) M. Sherif El-Eskandarany, K. Aoki, H. Itoh and K. Suzuki, J. Less-Common Met., Vol. 169 (1991) pp. 235-244.

(11) M. Sherif El-Eskandarany, K. Aoki, K. Sumiyama and K. Suzuki, Met. Trans. Vol. 30A, (1999) pp. 1877-1880.

(12) M. Sherif El-Eskandarany, Satoru Ishihara, Wei Zhang and A. .Inoue, Met. Trans. Vol. 33A (2005) pp. 141-148

(13) المتر الواحد يساوي مليار نانومتر، ومن ثم فإن 220 ألف نانومتر (220 ميكرومتر) تعني 0.00022 من المتر، أي 0.22 من المليمتر الواحد.

(14) M. Sherif El-Eskandarany, J. of Alloys Comp., Vol. 305 (2000) pp. 219-224.

(15) M. Sherif El-Eskandarany, M. Matsushita, and A. Inoue, J. of Alloys Comp. Vol. 329 (2001) pp. 239-252.

(16) M. Sherif El-Eskandarany, Wei Zhang, and A. Inoue, J. Mater. Res., Vol. 17 (2002) pp. 2447-2456.

(17) M. Sherif El-Eskandarany and A. Inoue, Met. Trans., Vol. 37 A (2006) pp. 2231-2238.

(18) القالب والغطاس الموضحان في الشكل، استُخدما من قبل مؤلف الكتاب في كبس ودمج عدد من مساحيق الحبيبات النانوية لمجموعة متنوعة من المواد.

(19) M. Sherif El-Eskandarany, M. Omori, M. Ishikuro, T. J. Konno, K. Takada, K. Sumiyama, T. Hirai and K. Suzuki, Met. Trans., Vol. 27A (1996) pp. 4210-4213.

(20) M. Sherif El-Eskandarany, Satoru Ishihara, and A. Inoue, J. Mater. Res., Vol. 18 (2004) pp. 2435-2445.

(21) M. Sherif El-Eskandarany, M. Omori, K. Sumiyama, T. Hirai and K. Suzuki, J. of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, JSPM, Vol. 44 (1997) pp. 1143-1147.

(22) M. Sherif El-Eskandarany, J. of Alloys Comp., Vol. 279 (1998) pp. 263-271.

(23) M. Sherif El-Eskandarany, Journal of Nanoparticles, Vol. 2 (2009) pp. 14-22.

(24) Courtesy of Xintek, Inc., Nanotechnology Innovations, North Carolina, U. S.A. (2009)

(25) الأصل في استخدام هذه الإبرة هو تلمس الذرات والجزيئات الموجودة على السطح الخارجي لمادة ما يُراد تحديد طوبوغرافيتها وبيان مقدار ثخانتها وتركيبها الكيميائي وتوزيع العناصر الداخلة في تركيبها.

(26) Eric Drexler, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 78, No. 9, September 1981, pp. 5275-5278, Chemistry Section.

(27) Eric Drexler, Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, John Wiley & Sons, New York ? USA (1992).

(28) M. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, Nature, Vol. 363 (1993) pp. 524-527.

(29) M. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, Science, Vol. 262 .(1993) pp. 218 ? 222

(30) نص ماقاله البروفيسور ريتشارد فينمان باللغة الإنجليزية هو:

«The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom».

لقراءة نص المحاضرة الكامل، أقترح زيارة الموقع التالي:

http://www.aps.org/publications/apsnews/200012/history.cfm

(31) Marvin L. Minsky, Virtual Molecular Reality, in Prospects in Nanotechnology: Toward Molecular manufacturing, (eds. Markus Krumenacker & James Lewis) Wiley, 1995 ISBN 0-471-30914-1.

(32) G. M. Whitesides and M. Boncheva, PNAS, Vol. 99 (2002) pp. 4769 - 4774.

(33) Duhua Wang and Gordon. P. Bierwagen, Progress in Organic Coatings, Vol. 64 (2009) pp. 327-338.

(34) C.J. Brinker and G.W. Scherer, Sol-Gel Science: the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1990.

(35) Alain C. Pierre, Introduction to Sol-Gel Processing, Kluwer, Boston, MA, USA, 1998.

(36) للقارئ المهتم بالتطبيقــات التكنولوجية العامة لمنتجات المواد النانوية، أقترح الاطلاع على الكتاب أدناه، رغم قدمه النسبي:

J.D. Wright and N.A.J.M. Sommerdijk, Sol-Gel Materials: Chemistry and Applications, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2001.

(37) الهــلام هو مادة جيلاتينية لزجة، تجمع في الشــكل بين خواص المواد الصلبة من حيث التجمع، وخواص المواد السائلة من حيث الميوعة. ويتمتع

الهلام بتماسكه، فهو لا يسيل مادام لم يُعرَّض لظروف خارجية تؤثر في استقراره، كتعريضه للحرارة مثلا. ولعل «الكريمات» و«الجيلاتينات» المستخدمة في تجميل وترطيب البشرة، أو لتصفيف الشعر، أمثلة حية وتطبيقية للهلام.

(38) G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Geber, Phys. Rev. Letters, Vol. 56 (1986) pp. 930-934.

(39) Y. Martin, C.C. Williams, H.K. Wickramasinghe, J. Appl. Phys. Vol. 61(1987) pp. 4723-4726.

(40) C.F. Quate, Surface Science, Vol. 299/300 (1994) pp. 980-995.

هوامش الفصل السابع:

(1) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(2) الغرافيت كلمة يونانية قديمة تعني «يكتب أو يرسُم» وقد عُرف بهذا الاسم منذ أواخر القرن السابع عشر. ويوجد خام الغرافيت في الطبيعة على صورة عروق Veins أفقية رقيقة السمك .(Horizontal Thin Sheets) Layers

(3) يعمل الآن أستاذا للكيمياء بمركز كاليفورنيا للتكنولوجيا، بالولايات المتحدة الأمريكية.

(4) يعمل الآن باحثا علميا في شركة تكساس للأجهزة، بالولايات المتحدة الأمريكية.

(5) Fuller, R. Buckminster. «Introduction», Critical Path, First Edition (in English), New York, N.Y.: St. Martin's Press, p. xxv. (1981), ISBN 0-312-17488-8. «It no longer has to be you or me. Selfishness is unnecessary and hence-forth unrationalizable as mandated by survival. War is obsoleteس.

(6) Fuller, R. Buckminster. Critical Path. New York: St. Martin's Griffin, (1981), p. 124. ISBN 0312174918.

(7) Hanying Li, Joshua D. Carter and Thomas H. La Bean, Materials Today, Vol. 12 (2009) pp. 24-32.

(8) Vicky V. Mody, Mohamed Ismail Nounou and Malavosklish Bikram, Advanced Drug Delivery Reviews, Vol. 61 (2009) pp. 795-807.

(9) Du Jing, Zeng Pan, European Journal of Mechanics - A/Solids, Vol. 28, (2009) pp. 948-954.

(10) Chun-Ru Wang, et al., Current Applied Physics, Vol. 2, Issue 2, April 2002, Pages 141-143.

(11) Michal Zalibera, Peter Rapta and Lothar Dunsch, Electrochemistry Communications, Vol. 10(2008) pp. 943-946.

(12) S. Iijima, Nature, Vol. 354 (1991) pp. 56 - 58.

(13) يتـــم تعيين مقاومة الشـــد لمادة ما، عن طريـــق تعريضها لحملين Loads متضادين في الاتجاه ومتســـاويين فـــي المقدار، بحيث يكون اتجاههما عموديا على مســـاحة مقطع Cross-sectional Area العينة، وفي الوقت نفســـه على اتجاه محـــور Axial Direction وينشـــأ عن تعريـــض العينة لتلـــك الأحمال، تولد إجهادات تســـمى إجهادات الشد Tensile Stresses وتُعد اجهادات الشد من أخطر الإجهادات التي يمكن أن يتعرض لها هيكل أي منشأ، حيث تؤدي في البداية إلى خضوع المنشـــأ لها، وظهور تشوهات Deformations دائمة به، الأمر الذي يدفع به إلى حافة الانهيار أو السقوط Failure or Rupture.

(14) الإدارة الوطنية للملاحة الفضائية والفضاء National Aeronautics and Space Administration.

(15) تم إهداء التقرير النهائي إلى مؤلف هذا الكتاب

Bradley C. Edwards, , NIAC Phase II Final Report, NASA Institute for Advanced Concepts Phase II, USA, 2003.

(16) M. Popov et al., Phys. Rev. B, Vol. 65 (2002) 033408. doi:10.1103/PhysRevB.65.033408

(17) S. Hong, S. Myung, Nature Nanotechnology, Vol. 2 (2007) pp. 207 - 208.

(18) Erik Thostenson, C. Li and T. Chou, Composites Science and Technology, Vol. 65 (2005) pp. 491 - 516.

هوامش الفصل الثامن:

(1) E. Keidel, Farben-Zeitung, Vol. 34 (1929) pp. 1242-1253.

(2) P. Sawunyama, A. Fujishima and K. Hashimoto, Langmuir, Vol. 15 (1999) pp. 3551-3559.

(3) H. Honda, A. Ishizaki, R. Soma, K. Hashimoto and A. Fujishima: J. Illum. Eng. Soc. (1998) pp. 42-48.

(4) K. Sunada, Y. Kikuchi, K. Hashimoto and A. Fujishima, Environ. Sci. Technol., Vol. 32 (1998) pp. 726-734.

(5) K. Sunada, T. Watanabe and K. Hashimoto, Environ. Sci. Technol., Vol. 37 (2003) pp. 4785- 4791.

(6) Z.D. Bolashikov and A.K. Melikov, Building and Environment, Vol. 44, (2009) pp. 1378-1385.

(7) مع تقديري الشـــخصي لجهود هذه الشـــركات، وثقتي في أمانة فرقها البحثية، بيد أنني لا أطمئن دائما إلى تلك النتائج السريعة التي توصلت إليهـــا، حيـــث لم تؤكدها بعد النتائـــج البحثية المُجراة مـــن قبل الهيئات الأكاديمية العريقة ومراكز البحوث العلمية الشـــهيرة، أشـــفق فعلا على حال إنســـان القرن الحادي والعشرين، فهو تارة يقع فريسة لأحد الأوبئة الناتجة عنه وعن أنشـــطته الشرعية وغير الشرعية، ومرات عديدة يقع تحت براثن منتجات تكنولوجية هلامية!

(8) R. Wang, N. Sakai, A. Fujishima, T. Watanabe and K. Hashimoto, J. Phys. Chem. B , Vol. 103 (1999) pp. 2188-2195.

(9) T. Shibata, H. Irie and K. Hashimoto: J. Phys. Chem. B Vol. 107, (2003) pp. 10696-10702.

(10) تم تصميم وتنفيذ الشكل بواسطة مؤلف هذا الكتاب.

(11) Akira Fujishima, Kazuhito Hashimoto, Toshiya Watanabe, Photocatalysis: Fundamentals and Applications, BKC Inc., Tio٢ Tokyo-Japan, 1st Edition, May 1999, P.32. ISBN : 493905103X 9784939051036.

(12) Kazuhito Hiroshi, et al., Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, (2005) pp. 8269 - 8285.

(13) R. Rossetti, S. Nakahara and L. E. Brus, J. Chem. Phys., Vol. 79, (1983) pp. 1086-1088.

(14) الفصل السابع من هذا الكتاب

(15) L. DiCarlo, et al., Nature, Vol. 460, (2009) pp. 240-244.

(16) السبيكة هي مزيج بين فلزين أو أكثر مذابين بعضهما في بعض إذابة كاملة، وذلك عند درجات حرارة تفوق نقط انصهار الفلزين. وتعد سبائك البرونز الناتجة عن إذابة عنصر الزنك في النحاس، وكذلك سبائك الصلب المكونة من مجموعة من العناصر الفلزية، مثل الكروميوم والنيكل، المُذابة في الحديد، نماذج شهيرة للسبائك الفلزية.

(17) الفصلان، الثالث والخامس من هذا الكتاب.

(18) M. Sherif El-Eskandarany: Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials, William Andrew Publishing Inc, New York 13815, the U.S.A. (2001) P. 34 - 44.

(19) H. Gleiter, Prog. Mat. Sci., Vol. 33 (1989) pp. 223-265.

(20) J.L. McCrea et al., Rev. Adv. Mater. Sci., Vol. 5 (2003) pp. 252-258.

(21) M. Amparo et al., Acta Biomaterialia, Vol. 5 (2009) pp. 181-192.

(22) Krzysztof Jozwik and Anna Karczemska, Diamond and Related Materials, Vol. (2007) pp. 1004-1009.

(23) Christopher Loo et al. Technology in Cancer Research & Treatment, Vol. 3 (2004) pp. 33-37.

(24) Yaohui Lv et al., Journal of Membrane Science, Vol. 331 (2009) pp. 50 - 56.

(24) الفصل الرابع من هذا الكتاب.

(25) M. Sherif El-Eskandarany, J. of Alloys Comp., Vol. 279 (1998) pp. 263-271.

(26) الصورة الموجودة في الشكل (ب) التُقطت بواسطة مؤلف هذا الكتاب خلال زيارته لمعبد الأقصر الكائن في مدينة الأقصر جنوب مصر، وذلك في العام 1998.

(27) يطلــق مصطلــح المعالجــة الحراريــة Heat Treatment علــى تلك العمليات التى تُجرى على السبائك الفلزية بغرض إزالة ما بها من عيوب وإجهادات داخلية بهدف تحســين خواصها وصفاتها المختلفة. هذا بينما يســتخدم مصطلح المعالجات الميكانيكيــة Mechanical Treatment للتعبير عن تلك العمليات التى يُوظف فيها عُدد أو آلات يُعامل بواسطتها الصلب والســبائك الفلزية من أجل تحســين خواصها الميكانيكية. وتعد عمليات الطرق والتسخين باستخدام المطارق أو المكابس من أقدم وأكفأ هذه العمليات. وقد استخدم القدماء تعبير تسقية الصلب Quenching للتعبير عن مســار معالجته حيث تتم بتسخين الصلب في درجات حرارة عاليــة تصــل إلى نحو 75 % من نقطة انصهــاره - ينصهر الصلب في درجــات حرارة تتراوح بــين 1536 - 1539 درجــة مئوية - ثم طرقه ومباغتته بعد ذلــك بالتبريد المفاجئ في الماء أو الزيت. ويتم تكرار هذه العملية عشرات المرات.

(28) Journal of Metals, TMS Society, Vol. 50, No. 10 (1998) page cover.

(29) Journal of Metals, TMS Society, Vol. 54, No. 9 (2002) page cover.

(30) الفصل السادس من هذا الكتاب.

(31) كثيرا ما يُطلق على هذه الأســلاك النانوية، أسماء أخرى، مثل العصي النانوية Nanorods، وذلك نظرا إلى اســتقامتها وانتصابها. وتســمى كذلك بالأسلاك الكمومية Quantumwires، رجوعا إلى تجلي خاصية التأثير الكمي على سمات وسلوك تلك الأسلاك.

(32) نتائج بحثية من أعمال غير منشورة لمؤلف هذا الكتاب.

(33) M. Law, et al., Annu. Rev. Mater. Sci., Vol. 34 (2004) pp. 83-92.

(34) S. De Franceschi, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 83 (2003) pp. 344-347.

هوامش الفصل التاسع:

(1) Ronald N. Kostoff, Raymond G. Koytcheff and Clifford G. Y. Lau. Current Science, Vol. 92 (2008) 1492-1499.

(2) Emma Marris. Nature, Vol. 444 (2006) 985-991.

(3) يستخدم مصطلح التوافر الحيوي Bioavailability للدلالة على مقدار نسبة وجود الجرعة الدوائية - جزيئات المادة الفعالة للدواء - في بلازما الدم بعد تعاطيها. وكلما زادت هذه النسبة واقتربت من الواحد الصحيح، دل ذلك على كفاءة الدواء وارتفاع قدرته العلاجية.

(4) تقوم جزيئات ناقلات الإرسال العصبية Molecules Neurotransmitters بتوصيل الرسائل والإشارات العصبية من وإلى المخ عبر ما يعرف باسم المشابك Synapses العصبية.

(5) تُعرف تلك الفئة من الحبيبات النانوية المُستخدمة في علاج حالات الاكتئاب باسم مضادات الاكتئاب الذكية Intelligent Antidepressant Nanoparticles.

(6) يقوم الحاجز الدماغي الدموي Blood Brain Barrier بحجب ومنع أي مواد غريبة من الذهاب إلى المخ، وهو يمثل في ذلك مصفاة للدم الواصل إلى مخ الإنسان.

(7) Christopher Loo et al. Technology in Cancer Research & Treatment, Vol. 3 (2004) 33-36.

(8) Mathias Schulenburg. Nanoparticles - small things, big effects, Cologne Federal Ministry of Education and Research, Berlin - Germany 2008, page 28.

(9) M.S. Eberhart et al. Morbidity and Mortality Weekly Report, Vol. 53 (2007) 1066-1072.

(10) John Mongillo. Nanotechnology. Greenwood Press, London, 2007.

(11) R. L. Jones. Soft Machines: Nanotechnology and Life. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004.

(12) H.J. Lee, et al. J. Mater. Sci., Vol. 38 (2003) 2199-2205.

هوامش الفصل العاشر:

(1) John Mongillo. Nanotechnology. Greenwood Press, London, 2007.

(2) Toni Tarver. Foodtechnology, Vol. 11 (2006) pp. 22.

(3) Emma Marris. Nature, Vol. 444 (2006) 985.

(4) U.S. FDA. 2007. Nanotechnology: A Report of the U.S. Food and Drug Administration Nanotechnology Task Force. July 25, 2007.

(5) G. Asadi and M. Mousavi. IUFoST (2006). DOI: 10.1051/IUFoST:20060739, page. 799.

(6) Jennifer Kuzma and Peter VerHage. Nanotechnology in Agriculture and Food Production: Anticipated Applications. Washington, DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, September 2006.

(7) يســتخدم مصطلح «ناقل» في الهندسة الوراثية حيث يفسر نقل جزيء يحمل الجين الغريب الذي يراد زرعه فى خلية أخري، حيث يقوم الناقل بمهمة توصيل هذا الجزيء إلى المكان المناســب داخل الخلية المضيفة التي تتعامل معه وكأنه أحد جيناتها الأصلية.

(8) J. Bath and A. Turberfield. Nature Nanotechnology, Vol. 2 (2007) pp. 275-283.

(9) Amparo Lopez-Rubio. et al. Food Hydrocolloids. Vol.23 (2009) pp. 1940-1948.

(10) Avelina Fernández, et al. Food Research International, Vol. 42 (2009) pp. 1105-1112.

(11) Christopher Thellen, et al. Journal of Membrane Science, Vol. 340 (2009) pp. 45-53.

هوامش الفصل الحادى عشر:

(1) توجد أكاســيد النيتروجين بالحالة الغازية فى صور عدة على هيئة مركبات هى: أكسيد النيتريك NO، ثانى أكسيد النيتروجين NO_2، أكسيد النيتروس N_2O، ثلاثي أكسيد ثنائي النيتروجين N_2O_3، رباعي أكسيد ثنائي النيتروجين N_2O_4 وخماسي أكسيد ثنائي النيتروجين N_2O_5 وتحتوي المياه الملوثة عادة على مجموعة من هذه المركبات التي يرمز لها كيميائيا بـ NO_x.

(2) Hemda Garelick and Huw Jones. Chemistry International, Vol. 30 (2008) pp. 312-319.

(3) S.R. Kanel, et al. Environmental Science and Technology, Vol. 39 (2005) pp. 1291-1299.

(4) T John Mongillo. Nanotechnology. Greenwood Press, London, 2007.

(5) D.B. Vance, «Arsenic - chemical behavior and treatment», http:// www. 2the4.net/arsenicart.htm

(6) G.N. Manju, C. Raji and T.S. Anirudhan. Water Res., Vol. 32 (1998) 3062.

(7) Jing Feng, Teik-Thye Lim. Chemosphere, Vol. 66 (2007) 1765.

(8) Yon Ju-Nam, Jamie R. Lead. Science of The Total Environment, Vol. 400 (2008) pp. 396-405.

(9) T. Pradeep, Anshup. Thin Solid Films (2010) In Press.

(10) P.K. Stoimenov et al. Langmuir, Vol. 18 (2002) pp. 6679-6687

(11) Z.D. Bolashikov, A.K. Melikov. Building and Environment, Vol. 44 (2009) pp. 1378-1386.

(12) Jérôme Taranto et al. Separation and Purification Technology, Vol. 67 (2009) pp. 187-195.

(13) Richard Cox et al. Atmospheric Environment, Vol. 43 (2009) pp. 5128-5137.

(14) Daria Kibanova et al. Applied Clay Science, Vol. 42 (2009) pp. 563-569.

هوامش الفصل الثالث عشر:

(1) Kourosh Kalantar-zadeh and Benjamin Fry. Nanotechnology-Enabled Sensors. Springer Science+Business Media Publisher, New York, The U.S.A. 2008.

(2) BCC Research Annual Report, IAS027A. MEMS, Biosensors and Nanosensors, Wellesley, MA, The U.S.A. 2008.

(3) R. W. Miles, K. M. Hynes, and I. Forbes. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, Vol. 51 (2005) pp. 1-12.

(4) Paolo Bondavalli, Pierre Legagneux and Didier Pribat. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 140 (2009) pp. 304-311.

(5) M. Penza et al. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 127 (2007) pp. 168-175.

(6) Tarushee Ahuja Rajesh and Devendra Kumar. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 136 (2009) pp. 275-283.

(7) J. Zhang, et al. Applied Physics Letters, Vol. 88 (2006) Article ID 123112.

(8) E. Comini, et al. Sensors and Actuators B-Chemical, Vol. 84 (2002) pp. 26-32.

(9) S. J. Ippolito, et al. Sensors and Actuators B-Chemical, Vol. 117 (2006) pp. 442-449.

(10) I. Simon et al. Sensors Actuators B , Vol. 73 (2001) pp. 1-9.

(11) O. Pummakarnchana, N. Tripathi, J. Dutta. Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 6 (2005) pp. 251-259.

(12) www.csiro.au/news/newsletters/0609_oceans/index.htm

(13) www.technologyreview.com

(14) NASA Nanotechnology Space Sensor Test Successful in Orbit Report Release : 07-140v(2007). Beth Dickey/Melissa Mathews Headquarters, Washington, U.S.A.

(15) Larry Senesac and Thomas G. Thundat. Materialstoday, Vol. 11 (2008) pp. 28-30.

هوامش الفصل الرابع عشر

(1) Wiwut Tanthapaichaoon et al., Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol. 13 (2003) pp. 23-30.

(2) N. Kostoff Ronald, et al., Current Science Vol. 92 (2007) pp. 1492-1499.

(3) The National Nanotechnology Initiative : Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry. National Nanotechnology Coordination Office, The U.S.A. Government, 2008.

(4) Fritz Allhoff and Patrick Lin. Nanotechnology & Society, Springer Science, New York, 2008. ISBN: 978-1-4020-6208-7

(5) William A. Goddard III, Donald W. Brenner, Sergey E. Lyshevski and Gerald J. Lafrate, Handbook of nanoscience Engineering and Technology, Second Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2007. ISBN 0-8493-7563-0

(6) A.L. Porter and J. Youtie, J. Nanoparticle Research, 2010. In press.

(7) تم استقاء البيانات الخاصة بالأنشطة البحثية الأصيلة بعلم وتكنولوجيا النانـو، من خلال زيارة مواقع كبرى دور النشـر العالمية، التي تنشـر تلك البحوث باللغة الإنجليزية، ومنها على سبيل المثال وليس الحصر، المواقع التالية:

www.springerlink.com

www.sciencedirect.com

www.nature.com

www.tms.org

www.mrs.org

www.jnanobiotechnology.com

www.cambridgescientificpublishers.com

(8) Thomson Reuters Science Citation Index Expanded, Report of World's Leading Citation Databases, 2009.

(9) اسـتخدم الأسـتاذ أحمد السـيد النجار، مصطلح «الربح من دون عمل» للتعبير عن هذا النوع من الاستثمار، وذلك في مقاله المنشور بمجلة العربي، في عددها الرقم 614 الصادر في يناير 2010، صفحات 126 - 133.

(10) Market Report Catalog: MEMS/Nanotechnology, Global Information, Inc. Tokyo-Japan, 2010. (web: www.the-infoshop.com)

(11) Jan Youtie , et al., J. Nanopart. Res., Vol. 10 (2008) pp. 981-986.
(12)World Intellectual Property Organization (WIPO)
www.wipo.int
(13) United States Patents and Trademark Office (USPTO)
www.uspto.gov/
(14) Japan Patent Office (JPO)
www.jpo.go.jp
(15) European Patent Office
www.epo.org/

(16) هـــذا إذا مـــا افترضنا أن كل هـــذه البراءات قد تُرجمـــت بالفعل إلى منتجات سلعية وتكنولوجية.



المؤلف في سطور

البروفيسور أ. د. محمد شريف الإسكندراني

* ولد في القاهرة في سبتمبر 1956.
* تخرج في كلية الهندسة - جامعة الأزهر عام 1981.
* نال درجتي الماجستير (1988) والدكتوراه (1992) في المواد المتقدمة وتكنولوجياتها من جامعة طوهوكو باليابان.
* يعمل منذ عام 2007 باحثا أول ومستشارا علميا في مكتب المدير العام لمعهد الكويت للأبحاث العلمية.
* عمل بروفيسورا مساعدا ثم بروفيسورا لتكنولوجيا النانو والمواد المتقدمة بمعهد بحوث المواد - بجامعة طوهوكو باليابان حتى عام 2002.
* عمل بروفيسورا (أستاذا) بكلية الهندسة جامعة الأزهر حتى عام 2005.
* عمل نائبا لرئيس أكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا في مصر - وكيل أول وزارة البحث العلمي - حتى عام 2007.
* انتخب نائبا لرئيس مركز العلوم والتكنولوجيا التابع لحركة دول عدم الانحياز لدورتين، وحتى عام 2007.
* حصل على جائزة الدولة (مصر) في العلوم الهندسية في عامي 1994 و2003.
* حصل على الميدالية الذهبية وتكريم جمعية الفلزات وتكنولوجيا المساحيق التابعة للحكومة اليابانية في عام 1997.
* ألف 124 بحثا منشورا باللغة الإنجليزية في المجلات العلمية العالمية المتخصصة في علوم المواد وتكنولوجيا النانو بالولايات المتحدة الأمريكية، وإنجلترا، وهولندا.
* حصل على أربع براءات اختراع في مواضيع متعلقة بإنتاج مواد النانو وتطبيقاتها التكنولوجية.



◢ هذا الكتاب

يتردد على مســـامعنا منذ فتــرة وجيزة مصطلح «تكنولوجيـــا النانـــو» وتطبيقاتها الفريـــدة في جميع المجـــالات بلا اســـتثناء. ونظرا إلى الدور الرئيســـي المتوقـــع أن تؤديه تلك التكنولوجيـــا المتقدمة للنهوض بالاقتصـــاد العالمـــي، ودورهـــا الرائـــد فـــي تطوير الصناعات الرئيســـية ومنتجاتها المختلفة، فقد لقبت باسم «تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين» الذي نحن على مشارف بداية عقده الثاني.

ويُعـــد هذا الكتاب، الذي يزخر بعشـــرات المراجع العلمية لنخبـــة وافرة من العلمـــاء المتميزين، بمنزلة مدخل ميســـر لعلـــم وتكنولوجيا النانـــو، حيث يعطي القارئ العربي المثقف من جميع التخصصات العلمية والميـــول الفكرية والثقافية، فكرة عامة وشـــاملة عن ماهية تلك التكنولوجيا وكيفيـــة إنتاجها. كما يعرض الكتـــاب، في صـــورة مبســـطة، التطبيقـــات الحالية والمستقبلية لتلك التكنولوجيا في المجالات الصناعية والحياتيـــة المختلفة، وكذلك دورهـــا الرائد في تعزيز الاقتصـــاد المبنـــي علـــى المعرفـــة، ويناقـــش المردود الاقتصـــادي والاجتماعي لها، وكيفية الاســـتفادة من مخرجاتها المبتكرة في البلدان العربية.

ISBN 978 - 99906 - 0 - 306 - 4
رقم الإيداع (2010/006)